

ВИХАРЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НОЖЕВЫХ
РАЗМАЛЫВАЮЩИХ МАШИН В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ**

05.21.03 - Технология и оборудование химической переработки биомассы
дерева; химия древесины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Екатеринбург 2020

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

Научные консультанты: **Алашкевич Юрий Давыдович**
академик РАО, доктор технических наук,
профессор, заслуженный работник высшей
школы Российской Федерации

Сиваков Валерий Павлович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Куров Виктор Сергеевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет промышленных
технологий и дизайна»

Ковернинский Иван Николаевич
доктор технических наук, профессор,
научный консультант ООО «Экотол Сервис»

Казаков Яков Владимирович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г.Ф.
Морозова»

Защита состоится «**25**» **марта** **2021 г. в 10.00** на заседании диссертационного совета Д 212.281.02 при ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» по адресу: 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, к. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», <http://www.usfeu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Шишкина Елена Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В целлюлозно-бумажной промышленности технический прогресс во многом зависит от совершенствования оборудования подготовки бумажной массы. Одной из важнейших операций производства бумаги является размол волокнистой массы. Процесс размола определяет основные свойства бумаги и картона. Прослеживая путь развития ножевых размалывающих машин (мельниц) можно отметить, что основным их принципом остается воздействие на волокна в зазоре между перекрещивающимися ножами. В последнее время диапазон применения мельниц существенно расширился благодаря использованию в линиях производства древесной массы из щепы. Ножевые размалывающие машины являются наиболее универсальным оборудованием размола.

Процесс размола в целлюлозно-бумажном производстве является очень энергоемким. На этот процесс расходуется более пятидесяти процентов энергии, потребной для всего производства бумаги и картона. При проектировании и эксплуатации мельниц одной из основных задач является обеспечение необходимых показателей волокнистых материалов при минимуме энергозатрат. Снижение энергоемкости процесса размола является важной народнохозяйственной проблемой. Для решения этой проблемы необходимо исследовать процессы, происходящие при размолке волокнистых материалов. Методы динамических расчетов ножевых размалывающих машин до настоящего времени носят полуэмпирический и фрагментарный характер.

Мельницы относятся к машинам с повышенной динамичностью, являются источником интенсивных колебаний поддерживающих конструкций, на которые они установлены. В соответствии с общей тенденцией развития машин увеличиваются рабочие параметры и единичные мощности мельниц с одновременным снижением их удельной металлоемкости, что приводит к возрастанию их виброактивности. При интенсивной вибрации увеличиваются динамические нагрузки, снижается надежность, интенсифицируется износ и повреждения деталей машин. Виброзащита является неотъемлемым условием при проектировании, изготовлении, монтаже, эксплуатации и модернизации мельниц. Одним из путей совершенствования эксплуатации ножевых размалывающих машин является разработка и внедрение методов и средств технической диагностики и виброзащиты мельниц. Разработка методов и средств технической диагностики и виброзащиты мельниц с целью повышения эффективности работы и безопасной эксплуатации является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием процесса размола в ножевых размалывающих машинах занимались известные российские ученые: Алашкевич Ю.Д., Гончаров В.Н., Куров В.С., Хлебников А.А., Пашинский В.Ф., Ширякин Б.В., Иванов С.Н., Каган В.Л., Гаузе А.А., Терентьев О.А., Бывшев А.В., Савицкий Е.Е., Добровольский П.П., Кудряшов В.Н., Шемякин Э.В., Ситов Н.Н., Легоцкий С.С., Лаптев Л.Н., Маслаков В.Г., Комаров В.И., Казаков Я.В., Ковернинский И.Н., Ковалев В.И., Фляте Д.М. и др.,

также этим вопросом занимались за рубежом Фокс Т., Эриксен О., Берг Д., Карлстрем Л., Мей В., Майлз К., Атак Д. и др.

Исследованием динамики ножевых размалывающих машин занимались Санников А.А., Старжинский В.Н., Витвинин А.М., Лебедев А.Д., Кипрушкин А.Н., Чимде А.Г., Засыпкина С.А., Странд В., Моуквист А. и др.

Выполненные исследования позволили определить требования к эффективности процесса размола и к разработке методов и средств технической диагностики, виброзащиты и управления функционированием мельниц.

Цель работы. Повышение энергоэффективности и надежности ножевых размалывающих машин.

Объектом исследования являются ножевые размалывающие машины.

Предметом исследования являются динамические процессы в ножевых размалывающих машинах.

Задачи исследований:

1. Исследовать модель волокнистых материалов при размоле.
2. Исследовать модель дискретного контакта двух тел с учетом особенностей процесса размола: тепловыделения в зоне контакта и износа гарнитуры. Исследовать коэффициент трения между ротором и статором и температурные напряжения в материале ножей гарнитуры.
3. Исследовать потоки волокнистых материалов в гарнитуре и осевые силы в мельницах.
4. Обосновать и экспериментально подтвердить диагностическую модель структурных параметров гарнитуры и функционирования ножевых размалывающих машин.
5. Исследовать колебания ножевых размалывающих машин, их узлов и элементов. Выявить источники колебаний, разработать динамические и математические модели этих систем, а также методики инженерного расчета. Исследовать особенности виброзащиты мельниц.
6. Выявить влияние на вибрацию статора технологических и режимных факторов размола. Разработать эффективный способ управления функционированием мельниц.

Научная новизной обладают:

1. Анализ контактного взаимодействия ножей ротора и статора при размоле волокнистых материалов с учетом тепловыделения и износа гарнитуры.
2. Способ управления функционированием мельниц.
3. Методы технической диагностики и виброзащиты ножевых размалывающих машин.
4. Результаты моделирования колебаний мельниц и их элементов (ротора, статора, ножей).

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость исследований состоит в разработке основ теории контактного взаимодействия ножей при размоле волокнистых материалов, которая описывает динамические процессы в ножевых размалывающих маши-

нах. Разработаны модели мельниц и способ управления их функционированием.

Практическая значимость исследований заключается в применении теоретических основ динамических расчетов при проектировании, монтаже, эксплуатации и модернизации ножевых размалывающих машин. На основе исследований разработана система рекомендаций, позволяющая обеспечить снижение энергоемкости и повышение надежности мельниц на целлюлозно-бумажных предприятиях. На основе разработанных рекомендаций оказана научно-техническая помощь АО «Соликамскбумпром», ООО «Окуловская бумажная фабрика», АО «Туринский ЦБЗ», ООО «Сухонский КБК», АО «Уралвторма» и других. Работа выполнялась в соответствии с госбюджетной темой «Исследование глобальной роли трансграничных лесов Евразии в снижении техногенных угроз в системе «человек-технологии-природа». Номер госрегистрации темы FEUG-2020-0013. «Экологические аспекты рационального природопользования».

Результаты исследований внедрены на целлюлозно-бумажных предприятиях, также в учебный процесс. Предлагаемый способ управления функционированием мельниц внедрен в производство. Новые технические решения отражены в 32 патентах и авторских свидетельствах.

Методология и методы исследования. В теоретических исследованиях использованы положения ряда фундаментальных наук: теории контактного взаимодействия тел, теории колебаний, динамики машин и теории механизмов и машин. При моделировании процессов использовался математический аппарат, преимущественно теории дифференциальных уравнений. Моделирование проводилось при помощи метода конечных элементов, реализованных в пакетах компьютерных программ Ansys и Ansys fluent.

Теоретические модели проверялись экспериментально на лабораторной установке и промышленных мельницах. При исследованиях анализировались временные реализации вибрационных процессов, спектральный и корреляционный, модальный и другие методы анализа. Измерение вибрации, характеристик волокнистых материалов и обработка результатов измерений проводилась в соответствии с требованиями государственных стандартов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод исследования взаимодействия ротора и статора ножевых размалывающих машин на основе теории контактного взаимодействия тел.
2. Основы теории динамики мельниц и их элементов, базирующие на методах теоретических и экспериментальных исследований вибрации.
3. Метод оценки технического состояния мельниц на основе теоретических и экспериментальных данных технического диагностирования.
4. Метод и алгоритм управления функционированием ножевых размалывающих машин по параметрам высокочастотной вибрации статора.

Степень достоверности научных положений, рекомендаций и выводов. Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов подтверждается экспериментальными данными, корректным использованием совре-

менных методов исследований, обобщением накопленного опыта по динамике размалывающих машин, непротиворечивости и воспроизводимости результатов, полученных теоретическим путем, а также проведением оценки адекватности разработанных моделей, использованием экспериментальных данных для расчетов и сопоставлений результатов. Основные результаты исследований были апробированы в расчетной практике и при решении задач повышения эффективности и надежности ножевых размалывающих машин. Результаты исследований внедрены в производство. Разработка научных основ процесса размола, технической диагностики и виброзащиты мельниц направлена на решение крупной научно-технической проблемы повышения эффективности, надежности и безопасной эксплуатации этого оборудования.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на конференциях с международным участием: «Социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса», Екатеринбург, УГЛТУ в 2003-2019 г.г.; «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» Екатеринбург, УГЛТУ в 2018-2020 г.г.; "ICMSIT-2020: Metrological Support of Innovative Technologies", Санкт-Петербург - Красноярск, 2020; "MIP: Engineering-2020 - Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering", Красноярск, 2020; «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» - MIST: Aerospace, Красноярск, 2018; «CAMSTech-2020: Современные достижения в области материаловедения и технологий», Красноярск, 2020; «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (MIP: Engineering-2019), Красноярск, 2019; «Виброакустические процессы в технологиях, оборудовании и сооружениях», «Виброакустическое проектирование. Вибродиагностика» (г. Екатеринбург, 1998-2020 г.г.); «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», Санкт-Петербург, 2019.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 118 печатных работ, в том числе 21 в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 15 в изданиях, рекомендованных ВАК, получено 32 патента и авторских свидетельств РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников, включающих 366 наименований. Основное содержание изложено на 313 страницах, включая 56 рисунков, 23 таблицы, приложение на 14 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, сформулирована её цель, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, а также её реализация и апробация.

Первый раздел работы посвящен анализу работ по исследованию процесса размола волокнистых материалов и динамике ножевых размалывающих машин. Исследование процесса размола ведется в двух направлениях: технологическом, связанном с изучением структуры волокон при размоле, и механическом, связанном с определением влияния различных факторов на работу ножевых размалывающих машин. Известны работы по исследованию процесса размола Ю.Д. Алашкевича и его учеников, В.Н. Гончарова, С.С. Легоцкого, Л.Н. Лаптева, Е.Е. Савицкого, Г.П. Буйлова, Я.В. Казакова, В.С. Курова, О.М. Шапорова, А.В. Бывшева, И.Н. Ковернинского, О.О. Эриксона, К.Б. Майлс и других.

Теории, описывающие силовое воздействие гарнитуры на волокнистый материал, носят полуэмпирический характер и не дают четкого представления о процессах, происходящих при силовом контактном взаимодействии ножей. В настоящее время развивается классическая теория контактного взаимодействия тел. Известны работы В.М. Александрова, М.И. Чебакова, А.И. Лурье, И.Г. Горячевой, В.В. Калинчук и других авторов, которые посвящены контактному взаимодействию. В диссертационной работе сделана попытка применить классическую теорию контакта двух тел к прикладной задаче процесса размола в ножевых размалывающих машинах.

Известны работы по исследованию динамики ножевых размалывающих машин В.Н. Старжинского, А.А. Санникова, А.Д. Лебедева, А.Н. Кипрушкина, Г. Шульца, А.Г. Чамде, С.А. Засыпкиной и других. Хорошо изучена Н.М. Вальщиковым динамика рубительных машин. Существующие в литературе единичные сведения по динамике мельниц и их элементов носят частный характер и не позволяют обоснованно и комплексно подходить к решению проблем виброзащиты и технической диагностики. Не разработаны методы и средства технической диагностики ножевых размалывающих машин. Известен лишь вибрационный контроль металлического контакта гарнитуры ротора и статора. На основании изучения состояния проблемы определена цель и сформулированы задачи исследований.

Второй раздел работы посвящен исследованию динамики ножевых размалывающих машин и их элементов. Рассмотрены силы, возбуждающие колебания мельниц: силы и моменты инерции неуравновешенных масс ротора, механическое и гидродинамическое воздействие размалываемого полуфабриката, воздействие муфты ротора. Все эти силы и моменты вращаются с одинаковой частотой вращения ротора ω . Фазы и амплитуды сил могут изменяться с течением времени (например, из-за износа гарнитуры или изменения температуры в зоне размола). Во всех случаях простое суммирование амплитуд всех гармонических нагрузок на основе принципа суперпозиции приводит к значительному

завышению расчетных параметров колебаний мельниц и их поддерживающих конструкций. Поэтому при динамических расчетах использованы вероятностные методы, основанные на теореме Ляпунова.

Мельницы и поддерживающие конструкции представляют единые динамические системы, которые, как правило, проектируют различные организации. Расчетная модель такой системы должна отражать расчет каждого конструктивного элемента отдельно и во взаимной их связи. Получены динамическая и математическая модели мельниц совместно с поддерживающей конструкцией на основе метода расчленения сложной динамической системы на парциальные подсистемы. Разработаны и апробированы инженерные методики динамического расчета мельниц совместно с поддерживающей конструкцией. Проведён расчёт мельниц МД-5Ш1А Сыктывкарского ЛПК, TF-52 и TWIN-66 фирмы Andritz АО «Соликамскбумпром». Ошибка в определении низших частот свободных колебаний таких систем не превышает 8%. Расчётные значения амплитуды колебаний элементов системы сравниваются с допускаемыми параметрами вибрации, регламентируемыми ГОСТ 26493-85 и ГОСТ 12.1.012-2004. В случае превышения параметров вибрации над допускаемыми значениями необходимо разрабатывать методы и средства виброзащиты.

Получена зависимость напряжение - сжатие при размоле волокнистого материала (рисунок 1,а). На графике можно выделить зоны упругой (ОА), упругопластической (АВ), пластической (ВС) деформации и зону разрушения волокнистой прослойки (CD). Экспериментально установлено, что предел текучести σ_{02} зависит от следующих факторов (перечислены в порядке значимости): вида полуфабриката; степени помола и средней длины волокна на входе в мельницу; концентрации и расхода волокнистого материала. В зоне CD возникает металлический контакт между ножами гарнитуры ротора и статора и нормальные напряжения резко возрастают до σ_{03} .

Модель волокнистого материала при размоле зависит от вида трения между гарнитурами: при жидкостном трении - модель стандартного тела Максвелла-Томсона, при граничном трении – модель Гука (рисунок 1,б).

Волокнистый материал при размоле в ножевых размалывающих машинах подвергается воздействию в виде периодически повторяющихся импульсов, частоты которых названы гарнитурными частотами (рисунок 2). Скорость скольжения ножей ротора относительно ножей статора может достигать скорости распространения звука в металле. При анализе вибрации с помощью неподвижно закрепленного вибропреобразователя на статоре необходимо учитывать эффект Доплера. Гарнитурные частоты определяются по формуле

$$f_{gi}^* = (n \cdot z_i / 60) \cdot \cos \beta_i / (1 \pm V/C), \quad (1)$$

где n - частота вращения ротора, мин^{-1} , z_i , β_i - число и угол перекрещивания ножей на i -ом ножевом поясе, C - скорость распространения звука в материале гарнитуры, V - скорость скольжения ножей ротора по ножам статора.

Погрешность расчета гарнитурных частот без учета вышеназванного эффекта может достигать до 40%, с учетом – до 8%.

Исследованы импульсы напряжения и деформации волокнистого материала в ножевых размалывающих машинах. Сделан вывод, что для повышения эффективности размола необходимо: увеличить число циклов нагружения, уменьшить время восстановления волокнистого материала и снизить значение вязкоупругих свойств волокнистого материала.

Реологические характеристики волокнистых материалов, в частности время релаксации, существенно зависят от концентрации. Время релаксации для волокнистого материала низкой концентрации составляет десятитысячные доли секунды, для щепы - десятки секунд.

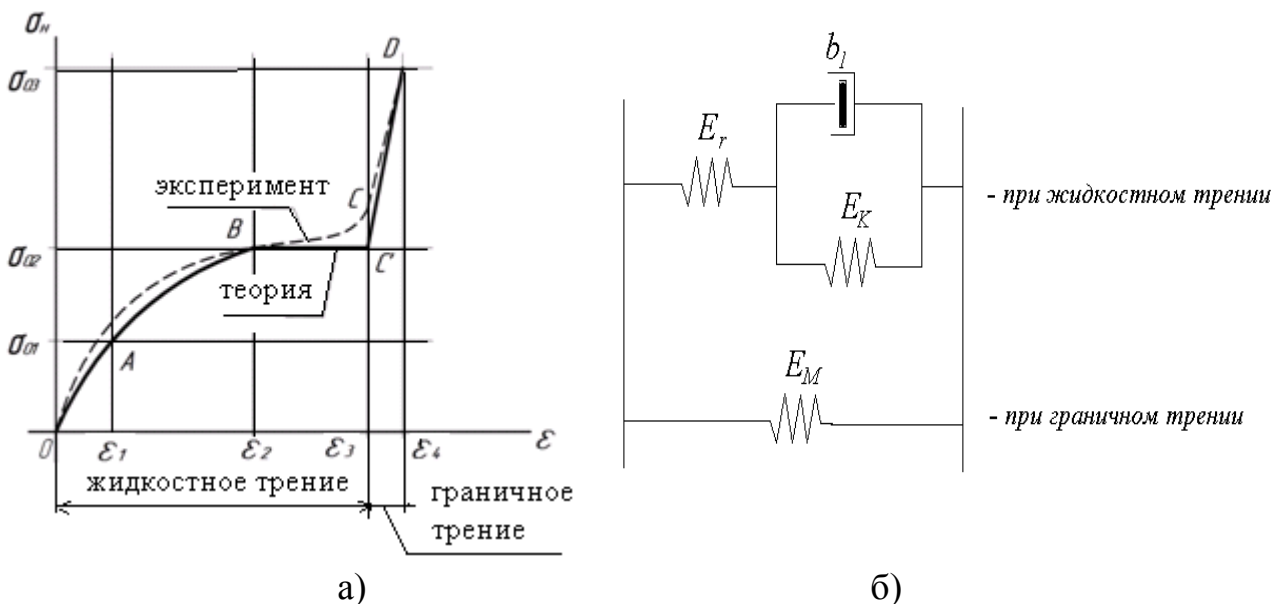


Рисунок 1 - Нормальное напряжение при размоле (а) и модель волокнистого материала (б) в ножевых размалывающих машинах



Рисунок 2 - Сегмент гарнитуры и гарнитурные частоты

Динамическая модель мельницы в продольном направлении представлена на рисунке 3,а. Математическая модель этой системы представляет собой систему линейных дифференциальных уравнений с периодически изменяющимися коэффициентами (уравнения Матье-Хилла), области устойчивости кото-

рых определяются по диаграмме Айнса-Стретта. Разработана методика и рассчитана амплитуда колебаний ротора и статора мельницы 54-60-1с фирмы Andritz при размоле термомеханической массы (рисунок 3,б). Амплитуда колебаний статора в 1,6 - 2,3 раза меньше, чем амплитуда колебаний ротора. Это вызвано большей жесткостью крепления статора к корпусу мельницы. Низшие частоты свободных продольных колебаний роторов ножевых размалывающих машин находятся в пределах от 85 до 165 Гц. Ошибка в расчетах этих частот не превышает 9%. При граничном трении ротора и статора амплитуда колебаний этих элементов увеличивается в 2 - 3 раза по сравнению с жидкостным трением.

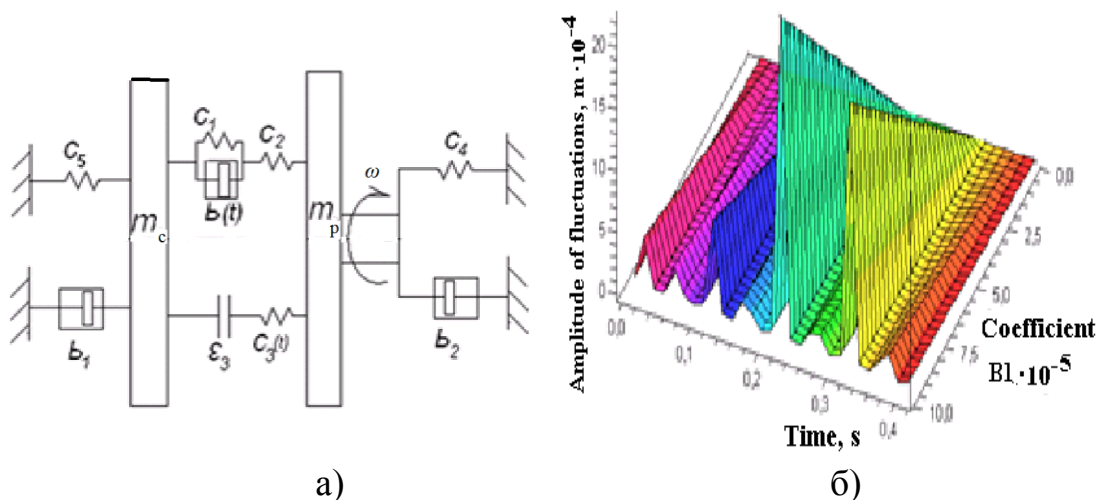


Рисунок 3 - Исследование продольных колебаний мельницы:
а) - динамическая модель; б) - амплитуда колебаний ротора

При проектировании и эксплуатации ножевых размалывающих машин необходимо выполнение условия стабильности межножевого зазора

$$S_a < A, \quad (2)$$

где A - номинальный межножевой зазор между ротором и статором мельницы, S_a - амплитуда колебаний ротора.

При невыполнении условия (2) между ротором и статором возникает граничное трение, что приводит к снижению надежности ножевой гарнитуры.

Исследованы динамическая и математическая модели, описывающие изгибные колебания ротора мельниц. На основании исследований разработана и апробирована методика расчета, учитывающая анизотропию опор, упругую податливость вала, действие гироскопического момента и осевой силы. Исследования так же проводились на моделях ротора при помощи компьютерной программы Ansys (рисунок 4). Ошибка в определении низших частот свободных изгибных колебаний роторов мельниц не превышает 9%. Не учет упругой податливости подшипников ротора приводит к ошибке в определении низших частот свободных колебаний роторов не более чем на 15%. Гироскопический момент увеличивает частоты свободных колебаний роторов мельниц не более чем на 25 %. Консольное расположение ножевого диска или конуса понижает

частоты свободных изгибных колебаний ротора в 1,1 - 1,4 раза по сравнению с межопорным расположением.

Ротор мельницы массой m_r и эксцентриситетом e вращается со скоростью ω (рисунок 5). Подшипники ротора моделируются пружиной c_p и демпфером b_p . В модели ротора предварительный натяг в подшипниках моделируется пружинами с коэффициентом жесткости c_s . В подшипниках с зазором пружины c_s отсутствуют.

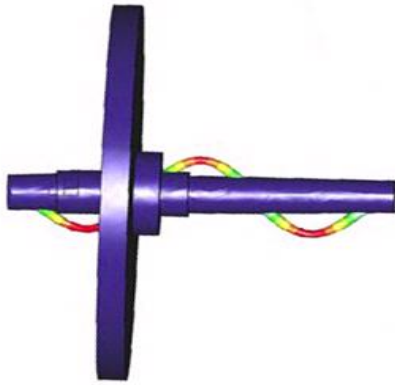


Рисунок 4 - Формы изгибных колебаний модели ротора

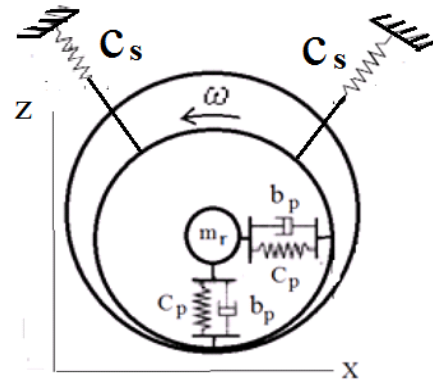


Рисунок 5 - Динамическая модель ротора в подшипниках с натягом

Уравнения, описывающие колебания ротора мельницы в подшипниковых опорах

$$\begin{aligned} m_r \ddot{x} &= m_r e \omega^2 \cos \omega t - F_x \\ m_r \ddot{z} &= m_r e \omega^2 \sin \omega t - F_z - m_r g, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_x , F_z – силы в подшипниковых опорах, $m_r g$ – сила тяжести.

Условие возникновения режима маятниковых колебаний ротора мельницы в подшипниковых опорах можно записать как $F_N > 0$ и $|F_T| = \mu_n F_N$. Условие стабильного положения ротора и отсутствия маятниковых колебаний $F_N > 0$ и $|F_T| < \mu_n F_N$, где μ_n – коэффициент трения в подшипниках, F_N , F_T – нормальная сила контакта и сила трения в подшипниковой опоре.

В результате исследования математической модели (3) получено выражение для определения силы предварительного натяга в подшипниковых опорах для стабилизации положения ротора и отсутствия маятниковых колебаний

$$F_c \geq [(B_3 \sin \hat{\omega} \hat{t} + B_4 \cos \hat{\omega} \hat{t} - \hat{g}) / 2 \cos \beta] c_p e, \quad (4)$$

$$\text{где } B_3 = 2\xi \hat{\omega} \left(A_1 \mp \left(\frac{1}{\mu} \right) A_2 \right) + A_2 \pm \left(\frac{1}{\mu} \right) A_1,$$

$$B_4 = 2\xi \hat{\omega} (A_2 \pm \left(\frac{1}{\mu} \right) A_1) - A_1 \pm \left(\frac{1}{\mu} \right) A_2,$$

$$A_1 = \frac{2\xi \hat{\omega}^3}{[(1-\hat{\omega}^2)^2 + (2\xi \hat{\omega})^2]}, \quad A_2 = \frac{(1-\hat{\omega}^2)\hat{\omega}^2}{(1-\hat{\omega}^2)^2 + (2\xi \hat{\omega})^2}, \quad \hat{g} = \frac{gm_r}{ec_p},$$

$$\hat{t} = t \sqrt{\frac{c_p}{m_r}}, \quad \hat{\omega} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{c_p}{m_r}}}, \quad \xi = \frac{b_p}{2\sqrt{m_r c_p}}.$$

Рассчитаны амплитуды колебаний роторного диска модели мельницы ТФ-52 в подшипниках с зазором и натягом. При номинальном радиальном зазоре 0,5 мм в подшипниках и эксцентриситете ротора 40 мкм амплитуда колебаний диска равна 0,75 мм. Эта амплитуда сопоставима с эксплуатационными межножевыми зазорами мельницы ТФ-52. В конструкции роторного узла этой мельницы заложено невыполнение условия (2).

Амплитуда колебаний ротора в основном определяется зазорами в элементах конструкции ротора. Не учет остальных факторов приводит к погрешности, не превышающей 30%. Расчетные амплитуды колебаний роторов мельниц находятся в пределах 0,2 - 0,9 мм. Для выполнения условия стабильности межножевого зазора (2) рекомендуется устранить радиальные зазоры в подшипниковых узлах, т.е. применять подшипники с предварительным натягом. Это позволит повысить эффективность мельниц и технический ресурс размалывающей гарнитуры.

Исследованы динамическая и математическая модели ножей гарнитуры аналитически и при помощи метода конечных элементов, реализованном в компьютерной программе Ansys. Разработана и апробирована методика расчета собственных частот колебаний ножа. Относительная погрешность в определении свободных частот изгибных колебаний ножей гарнитуры не превышает 9%.

Третий раздел посвящен исследованию процессов в межножевом зазоре мельниц. Задача описания контактного воздействия ножей гарнитуры рассмотрена в рамках развития классических моделей механики сплошных сред и основана на теории дискретного контакта двух тел (рисунок 6).

В зоне контакта Ω выполняется условие

$$w(x, z) = \delta + f(x, z), \quad (x, z) \in \Omega, \quad (5)$$

где $w(x, z)$ - нормальные перемещения границы волокнистого материала вследствие его деформирования при размоле, δ - сближение ножей ротора и статора за счет деформирования материала, $f(x, z)$ - обобщенная функция Хевисайда, описывающая рисунок ножей гарнитуры

$$f(x, z) = h_0/2 + \sum_{j=1}^n (1 - h_0/h_{pj}) h_{pj} \Delta \Gamma_{x_j, z_j}, \quad x \in (0, l), \quad z \in (0, r) \quad (6)$$

где $\Delta \Gamma_{x_j, z_j} = \Gamma(x, z - x_j, z_j) - \Gamma[x, z - x_j, z_j - (a+b)_j, c_j]$, $\Gamma(x, z)$ - единичная функция Хевисайда, x_j, z_j - координата точки начала j -го ножа, $(a+b)_j, c_j$ - соответственно ширина и длина j -го ножа, h_0 - толщина гарнитуры, h_{pj} - высота j -го ножа, n - число ножей.

Контактное давление $p(x, z)$ вне площадок контакта и на её границе $(-a(z), b(z))$

$$p(x, z) = 0, \quad (x, z) \notin \Omega, \quad p(-a(z)) = p(b(z)) = 0. \quad (7)$$

Нормальные перемещения и давление по координате x удовлетворяют условиям периодичности

$$w(x, z) = w(x + l, z), \quad p(x, z) = p(x + l, z). \quad (8)$$

Уравнение равновесия ножа имеет вид

$$\iint_{\Omega} p(x, z) dx dz = P, \quad (9)$$

где P - нагрузка на нож.

Для решения контактной задачи используется метод полос. Для каждой полосы решена соответствующая плоская периодическая задача. Введем безразмерные величины и получим давление в j -ой полосе зоны контакта ножей ротора и статора

$$\hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) = \frac{\zeta}{\hat{a}_H} \int_{-\hat{a}_j}^{\hat{x}} e^{\frac{(\hat{x}-\xi)\zeta}{\hat{a}_H}} \left(\xi^2 - \frac{2c\hat{a}_H}{\zeta} \xi - 2\hat{\delta} + \hat{z}_j^2 \right) d\xi. \quad (10)$$

Схема сил, действующих на ножи, показана на рисунке 7, где T_d, P_e - тангенциальная и нормальная составляющие силы реакции волокнистой прослойки.

Для площадки контакта $(a+b)$ ножей гарнитуры можно записать

$$\hat{P}_e = 2 \sum_{j=1}^N \Delta \hat{z} \int_{-\hat{a}_j}^{\hat{b}_j} \hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) \cos \varphi(\hat{x}) d\hat{x} \quad (11)$$

$$\hat{T}_d = 2 \sum_{j=1}^N \Delta \hat{z} \int_{-\hat{a}_j}^{\hat{b}_j} \hat{p}_j(\hat{x}, \hat{z}_j) \sin \varphi(\hat{x}) d\hat{x} \quad (12)$$

$$\mu = \frac{\hat{T}_d}{\hat{P}_e}, \quad (13)$$

где μ - коэффициент трения между гарнитурами.

Анализ полученных выражений контактного давления между ножами показывает, что контактные характеристики зависят от следующих параметров:

1. Относительного внедрения ножей в волокнистый материал $\frac{\delta}{a+b}$, где δ - сближение ножей ротора и статора в результате действия нагрузки на нож нагрузки P .

2. Параметров, характеризующих нагрузку $\hat{P} = \frac{2P}{(a+b)^3} h/E^*$, где E^* - приведенный модуль упругости волокнистого материала, $E^* = E_L/(1-\nu^2)$, E_L - длительный модуль упругости волокнистого материала, ν - коэффициент Пуассона.

3. Свойств волокнистого материала $s = T_\varepsilon/T_\sigma$, где T_ε, T_σ - время последнего действия и релаксации.

4. Числа Деборы волокнистого материала $\xi = T_\sigma V/a_H$, где a_H - длина площадки контакта ножей ротора и статора, V - скорость скольжения ножей ротора по ножам статора.

5. Плотности контакта ножей ротора и статора $l/(a+b)$, где l - шаг ножей.

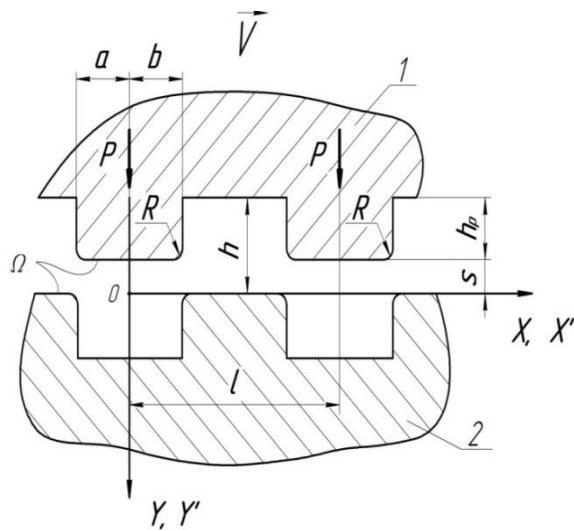


Рисунок 6 - Схема контактного взаимодействия ножей:
1- ротор; 2- статор

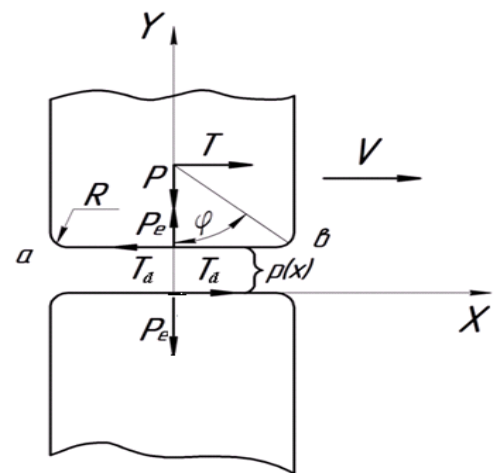


Рисунок 7 - Схема сил, действующих на ножи при размоле волокнистой массы

Зависимость контактного давления \hat{p} от смещения ротора показана на рисунке 8. Амплитуда импульсов контактного давления зависит от характеристик размазываемого материала и воздействий на него ножей гарнитуры.

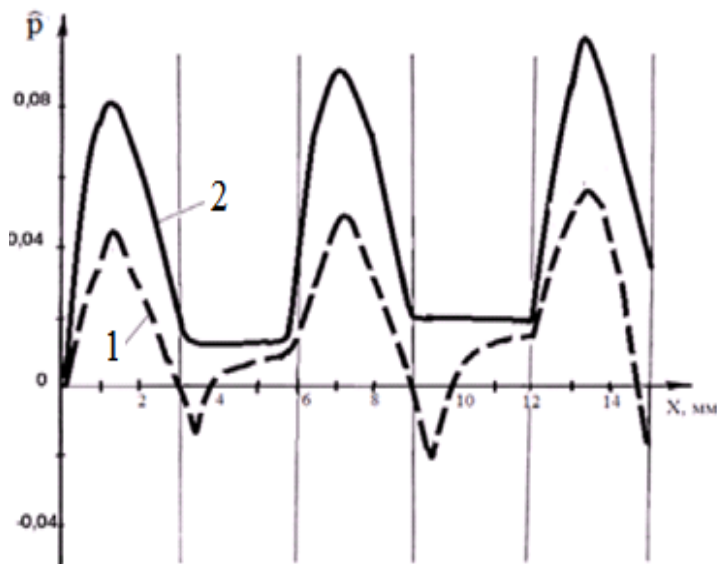


Рисунок 8 - Зависимость давления \hat{p} в зоне контакта от смещения ротора:

1 - модель целлюлозы небеленой сульфатной концентрацией 3%;

2 - модель еловой щепы концентрацией 45%

Зависимость деформационной оставляющей коэффициента трения между гарнитурами μ от параметра $1/\xi$, применительно к древесной массе при

$$\hat{p} = \frac{2P}{(a+b)^3} \frac{h}{E^*} = 0,08 \text{ представлена на рисунке 9.}$$

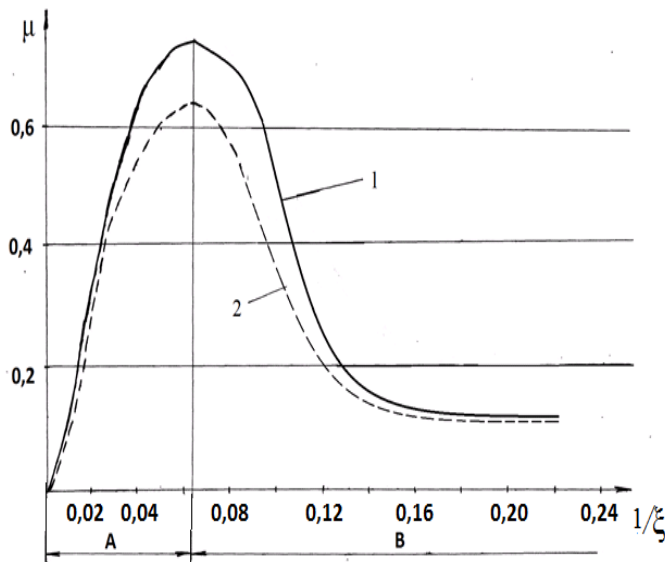


Рисунок 9 - Зависимость деформационной составляющей коэффициента трения между ножами от параметра $1/\xi$:

1- при низкой плотности контакта $\frac{1}{a+b} = 4$; 2 - при высокой плотности контакта $\frac{1}{a+b} = 2$;

А - зона размола щепы и массы высокой концентрации;

В - зона размола массы низких концентраций

Исследована прикладная контактная задача с учетом износа гарнитуры. Получена математическая модель, описывающая форму износа ножей гарнитуры. Форма износа ножей зависит от следующих параметров: от триботехнических свойств материала гарнитуры, отношения времен релаксации T_σ и последствия T_ε волокнистых материалов и отношения времени воздействия ножей гарнитуры за один период к времени последствия волокнистого материала $\zeta = \frac{l}{\frac{V}{T_\varepsilon}}$. Форма износа ножей гарнитуры несимметрична в диапазоне скорости скольжения V от $10^{-3} \cdot l/T_\varepsilon$ до $10^3 \cdot l/T_\varepsilon$. Наиболее выраженная асимметрия формы износа поверхности гарнитуры достигается при скорости скольжения $V = l/T_\varepsilon$. При прочих равных условиях в зависимости от параметра ζ изменяется глубина впадин (амплитуда волн) износа.

Исследована прикладная контактная задача с учетом тепловыделения при размоле. Получена математическая модель и разработана методика инженерного расчета для определения температуры статора T_1^k и ротора T_2^k

$$T_1^k = \frac{Vk(p)h_1(\lambda_2 r + 2h_2)}{2(\lambda_1 \lambda_2 r + \lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2)}, \quad T_2^k = \frac{Vk(p)h_2(\lambda_1 r + 2h_1)}{2(\lambda_1 \lambda_2 r + \lambda_2 h_1 + \lambda_1 h_2)}. \quad (14)$$

Результаты исследования температуры по радиусу гарнитуры представлены на рисунке 10. Максимальная температура в зоне контакта наблюдается в зоне 0,50 - 0,70 радиуса гарнитуры. Причем зона максимальных температур в зоне контакта совпадает с зоной нулевой скорости пара.

Разработана инженерная методика и рассчитаны тепловые напряжения в материале ножей гарнитуры. На краях ножа возникают напряжения растяжения, а в середине - напряжение сжатия. Эти температурные напряжения в 6-10 раз меньше предела текучести стали.

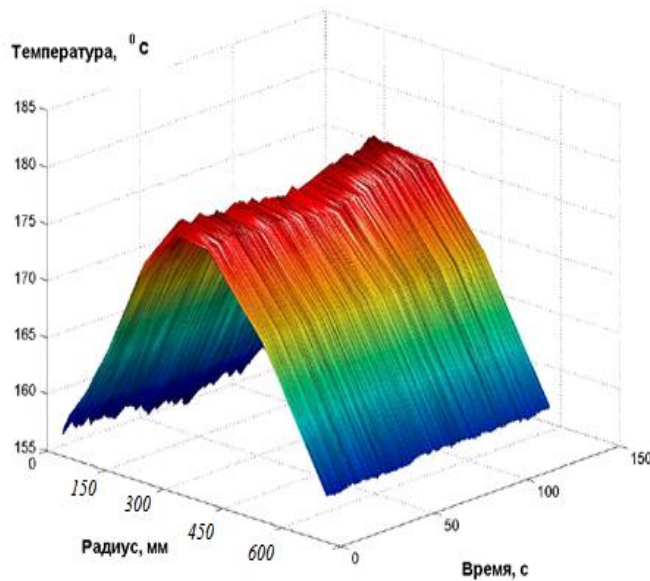


Рисунок 10 - Температура в зоне контакта ротора и статора мельницы радиусом диска 750 мм и давлением в зоне контакта $p=60$ МПа при размоле пропаренной еловой щепы

Исследованы силы, действующие на волокнистый материал в межножевом зазоре. Суммарная сила действующая на волокнистый материал в области контакта ротора и статора

$$\vec{F} = \vec{F}_s + \vec{F}_r + \vec{F}_t + \vec{F}_y, \quad (15)$$

где \vec{F}_y - центробежная сила, \vec{F}_r , \vec{F}_t - радиальная и тангенциальная составляющие силы трения волокнистого материала о гарнитуру, \vec{F}_s - сила действия пара на волокнистый материал.

Пар движется к периферии гарнитуры при

$$\vec{F}_y > \vec{F}_t + \vec{F}_r \quad (16)$$

и к центру гарнитуры при

$$\vec{F}_y < \vec{F}_t + \vec{F}_r. \quad (17)$$

При помощи разработанной теории контактного взаимодействия ножей исследована деформационная составляющая коэффициента трения между ротором и статором. Расчет контактных сил \hat{P}_e и \hat{T}_d при номинальном давлении в зоне размола проводился на модели применительно к размолу еловой щепы концентрацией 40% на периферийном ножевом поясе гарнитуры. Результаты представлены на рисунке 11, на котором виден период гарнитурой частоты. При этом коэффициент трения $\mu = \frac{\hat{T}_d}{\hat{P}_e} = 0,4 - 0,6$.

При повышении концентрации волокнистого материала контактные силы возрастают, причем тангенциальная составляющая \hat{T}_d увеличивается больше, чем нормальная \hat{P}_e составляющая силы реакции волокнистой прослойки. С увеличением концентрации размалываемого полуфабриката с 20 до 55% коэффициент трения μ увеличивается с 0,4 до 0,8. При увеличении давления в межножевом зазоре с 0,50 до 0,65 МПа коэффициент трения возрастает от 0,43 до 0,56 при концентрации полуфабриката 45%.

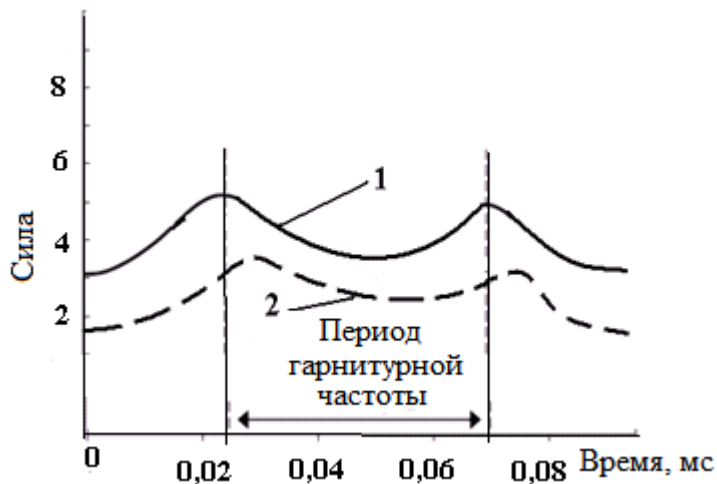


Рисунок 11- Зависимость контактных сил от времени:

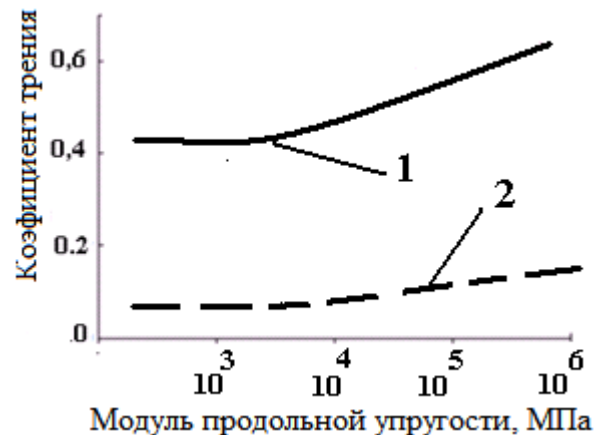
- 1- нормальная сила \hat{P}_e ;
2 - тангенциальная сила \hat{T}_d

На рисунке 12,а представлена зависимость коэффициента трения от линейной скорости ротора. Коэффициент трения при размоле волокнистых материалов низкой концентрации возрастает с 0,11 до 0,18 при увеличении скорости от 30 до 200 м/с. Размол щепы и волокнистых материалов высокой концентрации происходит со снижением коэффициента трения с 0,65 - 0,80 до 0,42 - 0,50 при повышении скорости от 30 до 200 м/с. При низкой плотности контакта ножей ротора и статора коэффициент трения повышается, при высокой – снижается.

Уменьшение приведенного модуля упругости материала гарнитуры с $2,1 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^3$ МПа приводит к снижению коэффициента трения в 1,5-1,8 раза (рисунок 12,б).



а)



б)

Рисунок 12 - Зависимости коэффициента трения от скорости ротора (а) и приведенного модуля упругости материала гарнитуры (б):

- 1- размол щепы и массы высокой концентрации;
2- размол массы низкой концентрации

Зависимости изменения параметров мельницы при размоле еловой щепы концентрацией 45% от межножевого зазора представлены на рисунке 13. Можно выделить две зоны - размол с граничным и жидкостным трением ротора и

статора. При граничном трении коэффициент трения и мощность привода снижаются, но резко увеличивается интенсивность износа гарнитуры и амплитуда высокочастотной вибрации статора.

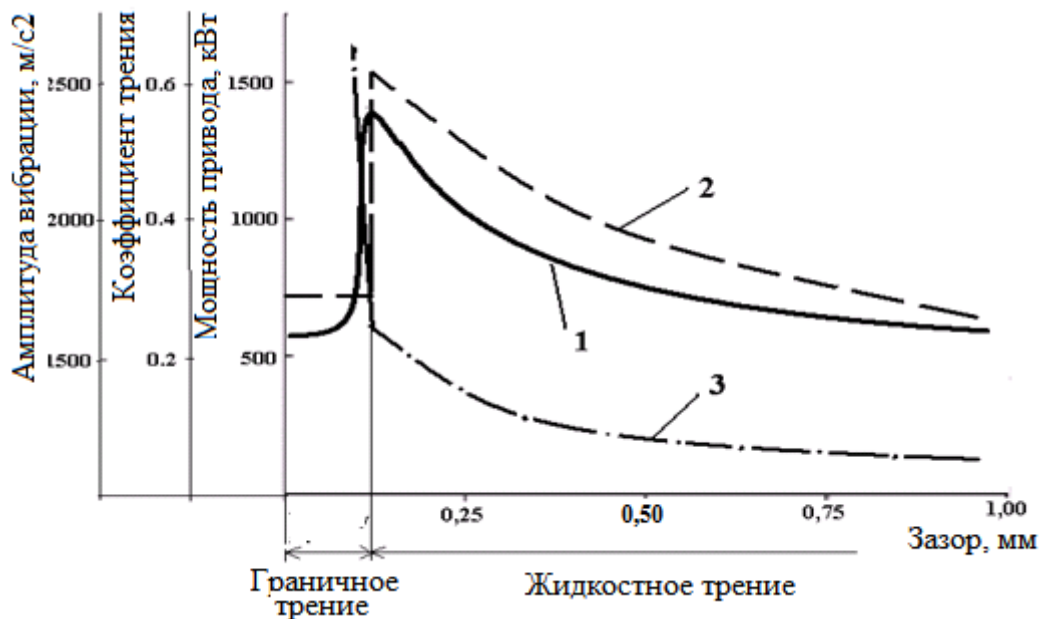


Рисунок 13 - Зависимости параметров мельницы от межножевого зазора: 1- мощность привода; 2 - коэффициент трения; 3- амплитуда высокочастотной вибрации статора

Разработана методика расчета осевой силы, действующей на ротор мельницы, при равномерном и неравномерном давлении в зоне размола. Осевая сила, действующая на ротор

$$F_y^n = - \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} r \delta_1(r, \eta) dr d\eta + \left[\int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} r \delta_2(r, \eta) dr d\eta \right] S_{ном} - \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \sum_{i=1}^n r [\delta_{3i}(r, \eta) - \delta_{4i}(r, \eta) S_{ном}] \cos(\omega_{zi} t) dr d\eta, \quad (18)$$

где $\delta_1(r, \eta)$, $\delta_2(r, \eta)$, $\delta_{3i}(r, \eta)$, $\delta_{4i}(r, \eta)$ - функции распределения давления в межножевом зазоре.

При помощи пакета компьютерных программ Ansys fluent исследована гидродинамика потоков в канавках гарнитуры ротора и статора (рисунок 14).

Расход и скорость потока в канавках ротора зависят от частоты вращения ротора. При увеличении частоты вращения с 600 до 1000 мин⁻¹ расход увеличивается в 2,3 - 5,4 раза, а скорость в 2,4 - 2,6 раза. Расход и скорость потока в канавках статора не зависят от частоты вращения. При увеличении разницы давления между выходом и входом канавки с 60 до 135 кПа расход потока в канавках ротора уменьшается в 1,4-1,5 раза и увеличивается в канавках статора в 2,1-

2,2 раза. Поток в канавке ротора направлен от центра к периферии гарнитуры, а в статоре, наоборот, от периферии к центру.

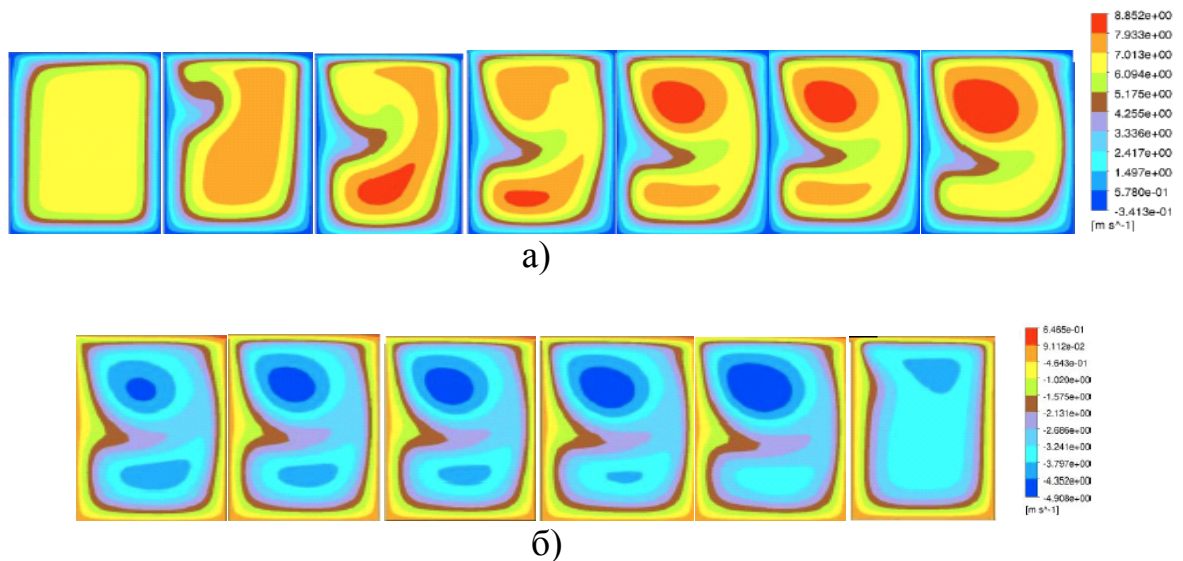


Рисунок 14 - Скорость потоков по длине канавки гарнитуры:
а) - ротора; б) - статора

Скорость потока в межножевой канавке статора при увеличении перепада давления с 60 до 135 МПа увеличивается 2,3 - 2,6 раза, а у ротора скорость потока снижается в 1,6 - 2,7 раза. Скорость потока ротора изменяется при изменении угла наклона канавки к радиусу гарнитуры. При угле наклона 20° по направлению вращения ротора скорость потоков увеличивается в 1,2 раза. И при угле наклона 20° против направления вращения ротора скорость потока уменьшается в 1,1 раза. При входе в межножевую канавку скорость потока резко возрастает, достигает максимума на длине канавки 5-10 мм, затем монотонно повышается примерно в 1,2 - 1,5 раза по ходу канавки. Исследованы скорости потока и гидродинамические вихри в роторе и статоре. Интенсивность гидродинамических вихрей в роторе выше, чем в статоре.

В работе исследована вибрация, вызванная гидродинамическими силами в ножевых размалывающих машинах. Гидродинамическая сила складывается из следующих основных составляющих: удара полуфабриката о лопасти шнека и ножи гарнитуры, взаимодействия прямого и обратного потоков и давления на ножи гарнитуры. Результаты теоретических и экспериментальных исследований гидродинамической вибрации представлены на рисунке 15.

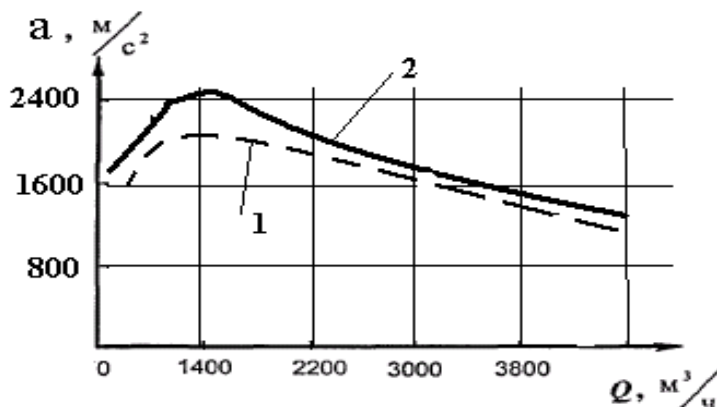


Рисунок 15 - Амплитуда гидродинамической вибрации мельницы МД-3Ш7 при размоле еловой древесной массы при изменении производительности: 1-теория; 2- эксперимент

В четвертом разделе диссертации рассмотрены особенности виброзащиты ножевых размалывающих машин. Параметры вынужденной вибрации должны быть меньше допустимых значений, а абсолютное значение разности между частотой свободных колебаний конструкции ω_0 и частотой возбуждающих колебаний сил ω не менее 30% частоты свободных колебаний системы

$$|\omega_0 - \omega| \geq 0,3\omega_0. \quad (19)$$

Суммарная неуравновешенность ротора мельницы состоит из механической, гидравлической и гидродинамической составляющих. Механическая неуравновешенность ротора складывается из трех составляющих: конструкционной, технологической и эксплуатационной. Эксплуатационная неуравновешенность ротора возникает из-за неравномерного износа гарнитуры и температурных деформаций. Механическая неуравновешенность ротора мельницы изменяется в процессе эксплуатации гарнитуры и может увеличиваться до 2,5 раз по сравнению с этим показателем в начале её эксплуатации. Гидравлическая и гидродинамическая составляющие неуравновешенности могут увеличивать суммарную неуравновешенность ротора до 1,4 раза. В работе разработана методика расчета этих составляющих неуравновешенности.

В конструкции ротора целесообразно использовать автоматическое балансировочное устройство, которое позволяет компенсировать неуравновешенность без остановки мельницы. Разработаны динамическая и математическая модели пассивного автобалансирующего устройства ротора мельницы. На основании проведенных исследований разработаны методики расчета и конструкции активных и пассивных автобалансирующих устройств. Конструкции автобалансирующих устройств защищены патентами.

Низшие частоты свободных изгибных колебаний роторов промышленных мельниц ω_{01} лежат в пределах 45 - 68, а коэффициенты динамического усиления при резонансе - в пределах 17 - 24. Низшие частоты свободных продольных колебаний роторов мельниц (кроме сдвоенных мельниц) лежат в пределах 90 - 165 Гц, коэффициенты динамического усиления при резонансе - 5 - 7. Частоты вращения роторов мельниц ω находятся в пределах от 10 до 35 Гц. При конструктивных методах виброзащиты изменяют либо частоты возбуждающих колебаний сил, либо конструктивные характеристики ротора. Например, изменение длины консоли или расстояния между подшипниковыми опорами ротора позволяет изменять его динамические характеристики (рисунок 16).

Разработана и апробирована методика динамического расчета ножей гарнитуры, которая позволяет определять резонансные режимы работы гарнитуры. Определение резонансных режимов рекомендуется производить с помощью резонансной диаграммы Кемболла. Возможны следующие мероприятия по уменьшению колебаний ножей гарнитуры. Во-первых, изменить возбуждающие гарнитурные частоты или частоты свободных колебаний ножей для выполнения условия (19). Это можно достичь следующими путями: изменением частоты вращения ротора, изменением конструктивных параметров ножей и

выбором материала ножей гарнитуры. Второй вид мероприятий - применение в конструкциях гарнитуры демпфирующих устройств. Разработана и защищены патентами конструкции наборной гарнитуры с демпфирующими устройствами.

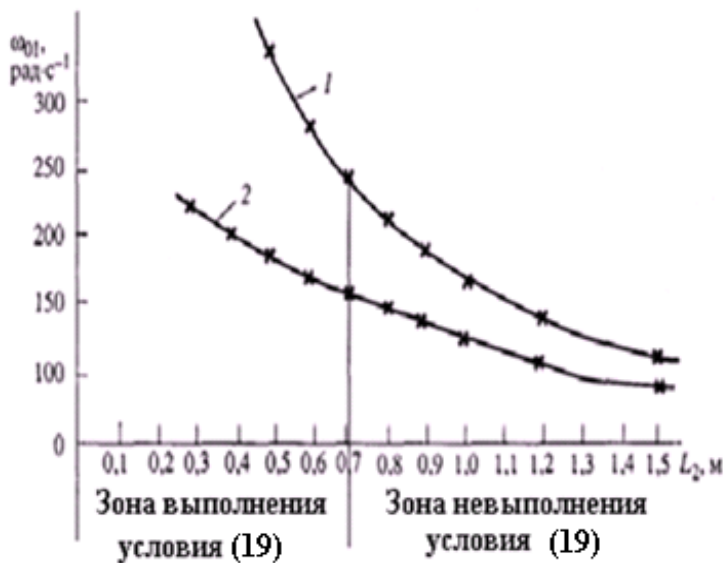


Рисунок 16 - Зависимость низших частот свободных колебаний модели ротора мельницы МД-5Ш1А от длины консоли ротора:
1-в вертикальном направлении;
2-в горизонтальном направлении

Разработаны и внедрены системы виброизоляции и динамического виброгашения мельниц и их поддерживающих конструкций на АО «Соликамскбумпром» и АОр «Туринский ЦБЗ».

Пятый раздел работы посвящен технической диагностике, которая состоит из диагностики структурных параметров технического состояния и диагностики функционирования мельниц. Функциональная схема технической диагностики и управления функционированием мельниц представлена на рисунке 17. Обобщенная структурная схема диагностической модели функционирования и структурных параметров мельницы представлена на рисунке 18.

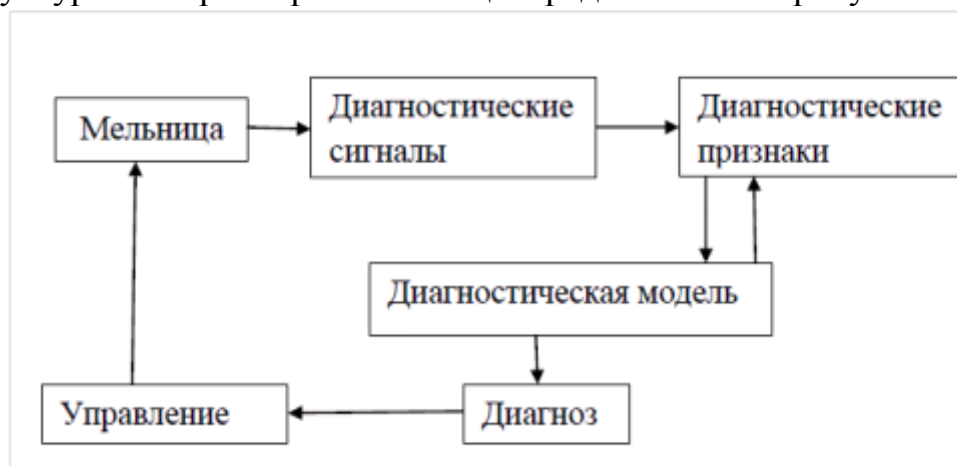


Рисунок 17 - Функциональная схема технической диагностики и управления функционированием мельниц

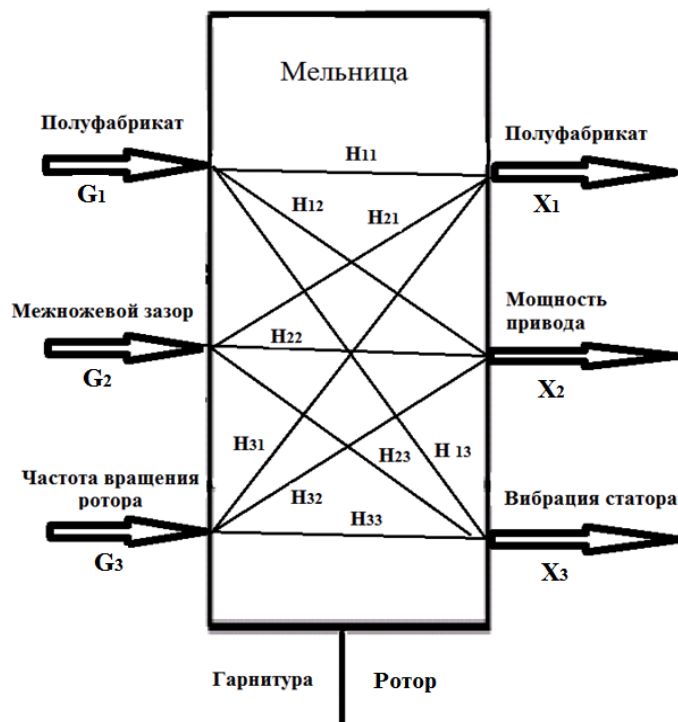


Рисунок 18 - Обобщенная структурная схема диагностической модели функционирования и структурных параметров мельницы

Диагностическую модель, которая связывает параметры вибрации статора мельницы с факторами, влияющих на ход размола, можно записать как

$$a_{ak} = \sum_{i=1}^n f_i^*(W_i, \Delta M_i) G_i(R_0, Q_0, R_i, \omega_i) \omega_i^2, \quad (20)$$

где $f_i^*(W_i, \Delta M_i)$ - функция, описывающая влияние i -го параметра на ход размола и изменение характеристик размалываемого материала; $G_i(R_0, Q_0, R_i, \omega_i) \omega_i^2$ - передаточная функция, которая характеризует i -ый отклик системы.

Техническое нормирование по ГОСТ 26493-85 устанавливает допустимые значения вибрации для оборудования целлюлозно - бумажных производств, в том числе и для мельниц. Вибрационные характеристики служат критериями качества, надежности и безопасности оборудования. Однако ГОСТ 26493-85 устарел, не учитывает новые конструкции ножевых размалывающих машин и требования государственных и международных стандартов.

Предлагается установить два критерия оценки вибрационного состояния ножевых размалывающих машин. Первый критерий нормирует амплитуду вибрации в октавных полосах частот, по второй - тренд вибрации по общему уровню. Для оценки вибрации мельницы и принятия решений о необходимых действиях в конкретной ситуации устанавливаются четыре зоны состояния. Зона А - в эту зону попадает, как правило, вибрация новых мельниц, вводимых в эксплуатацию. Зона В - машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают пригодными без ограничения сроков для эксплуатации. Зона С - мельницы, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают непригодными для длительной непрерывной эксплуатации. Такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ. Зона D - уровни вибрации в данной зоне вызваны серьезными повреждениями.

Проведен статистический анализ параметров вибрации мельниц различных типоразмеров с использованием пакета программ Statistica 13. Анали-

зируя полученные результаты, можно сделать вывод, что параметры вибрации мельниц различных типоразмеров не подчиняются закону нормального распределения, т. е. статистически неоднородны. Для обеспечения однородности полученных результатов выявлена необходимость разделения мельниц на две группы: с диаметром диска или конуса до 1000 мм включительно и с диаметром свыше 1000 мм. Границы зон А/В, В/С, С/Д параметров вибрации мельниц приведены в таблице 1. Блок-схема определения технического состояния мельницы представлена на рисунке 18.

Высокочастотная вибрация статора мельницы является следствием импульсного давления в зоне размола, о чем свидетельствует соответствие спектров изменения режущей длины гарнитуры и высокочастотной вибрации статора. Увеличение частоты вращения ротора и числа ножей приводит к увеличению гарнитурных частот. Уменьшение угла перекрещивания ножей ротора и статора приводит к уменьшению ширины частотных пиков и к увеличению гарнитурных частот и их амплитуд. И наоборот, увеличение этого угла приводит к увеличению ширины пиков и уменьшению гарнитурных частот и их амплитуд.

Таблица 1- Допускаемые параметры вибрации мельниц

Диаметр диска (конуса) мельницы, мм	Границы зон	Среднее квадратическое значение виброскорости, мм/с в октавных полосах с предельными частотами, Гц						Тренд виброскорости, (мм/с)/ч
		2,8-5,6	5,6-11,2	11,2-22,5	22,5-45	45-90	90-180	
До 1000 мм включительно	А/В	-	0,5	0,8	0,8	0,8	-	-
	В/С	-	1,2	1,8	1,8	1,8	-	1,5
	С/Д	-	1,6	2,6	2,6	2,6	-	2,0
Свыше 1000 мм	А/В	-	0,8	1,4	1,4	0,8	-	-
	В/С	-	1,8	2,8	2,8	1,8	-	2,0
	С/Д	-	2,7	4,0	4,0	4,0	-	3,0

Выявлено влияние на амплитуду гарнитурной вибрации технологических и режимных факторов размола (перечислены в порядке значимости): вид волокнистого материала и его характеристики на входе в мельницу, удельная нагрузка на кромки ножей или расход полезной энергии, концентрация и расход массы. При увеличении первого или четвертого фактора амплитуда гарнитурной вибрации снижается, при увеличении второго или третьего факторов - возрастает.

Оценивая амплитуду высокочастотной гарнитурной вибрации, можно управлять функционированием мельниц (таблица 2).

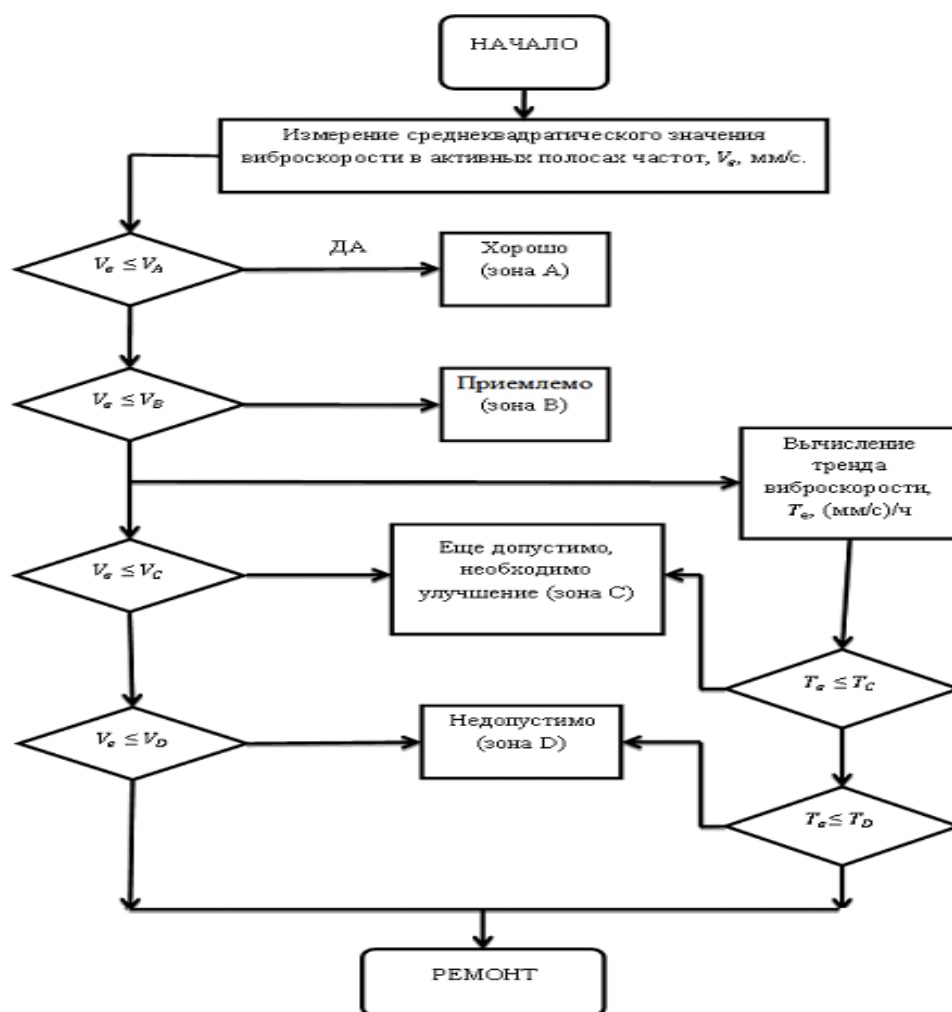


Рисунок 18 - Блок-схема определения технического состояния мельницы

Таблица 2 - Корреляция между диагностическими признаками и характеристиками бумажной массы при размоле

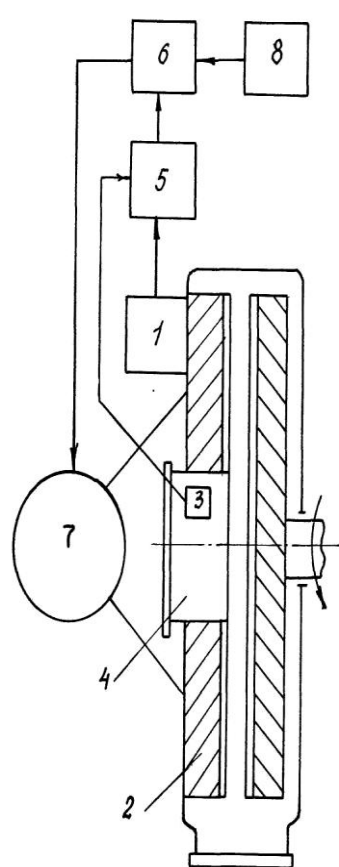
Диагностический признак	Коэффициенты корреляции		
	Прирост степени помола массы	Изменение разрывной длины	Изменение длины волокна
1. Удельная нагрузка на кромки ножей	0.77 ± 0.14	0.71 ± 0.18	0.74 ± 0.16
2. Изменение температуры размалываемой массы	0.71 ± 0.18	0.69 ± 0.19	0.73 ± 0.16
3. Амплитуда высокочастотной вибрации статора мельницы	0.79 ± 0.13	0.78 ± 0.14	0.82 ± 0.12

Диагностические признаки технического состояния гарнитуры и функционирования мельниц приведены в таблице 3.

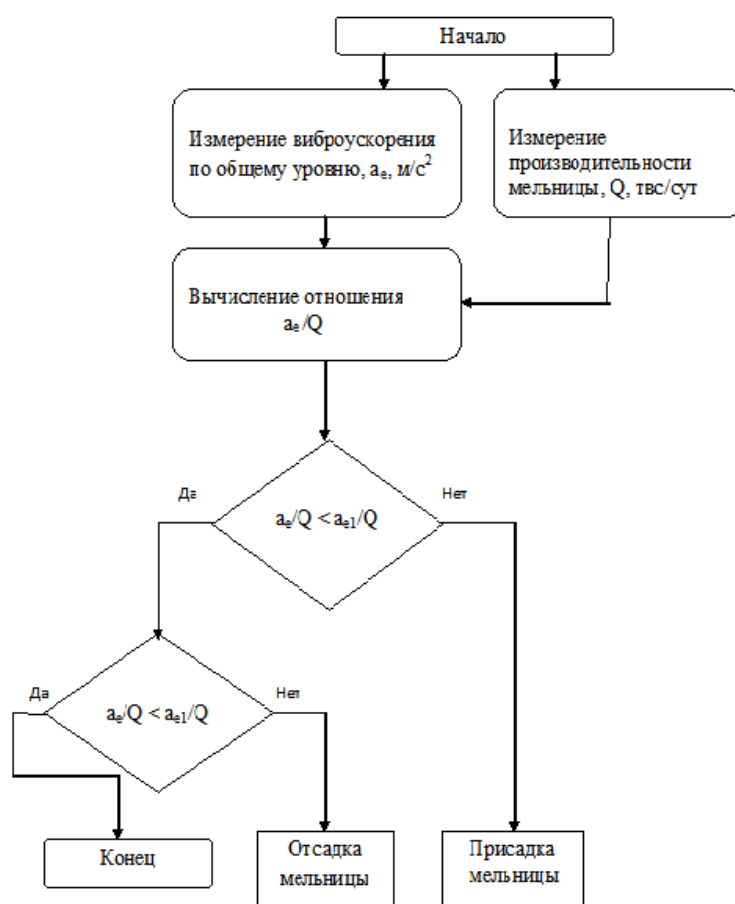
Таблица 3 - Диагностические признаки технического состояния гарнитуры и правильности функционирования мельниц при вибрационной диагностике

Функциональные и структурные параметры технического состояния	Диагностический признак
1. Правильность функционирования	
1.1 При постоянной производительности	Уровень виброускорения статора
1.2 При переменной производительности	Отношение уровня виброускорения статора к производительности
1.3 Мельницы со ступенчатой регулировкой зазора	Уровни виброускорения статора на гарнитурных частотах периферийных ножевых зон
2. Структурные параметры технического состояния гарнитуры	
2.1 Непараллельность ротора и статора	
2.1. Перекос гарнитуры статора	Уровни виброускорения в трех точках на периферии статора, лежащих на одном радиусе и одинаковых расстояниях друг от друга
2.1.2 Торцевое биение гарнитуры ротора	Амплитуда первой или третьей гармоники оборотной частоты амплитудной огибающей виброускорения статора на максимальной гарнитурной частоте
2.2 Износ гарнитуры	Уровень виброускорения статора (или его отношение к производительности) при постоянной мощности приводного двигателя

Разработанный способ управления функционированием ножевых размалывающих машин реализован при помощи стационарной системы автоматического управления работой мельницы. Система позволяет контролировать и поддерживать автоматически постоянным заданный уровень импульсов давления на волокнистый материал в зазоре между ротором и статором (рисунок 19,а). Разработанная система также предохраняет гарнитуру от металлического контакта и разрушения при попадании в межножевой зазор инородных тел. В качестве диагностического признака используется амплитуда виброускорения статора или отношения амплитуды виброускорения к производительности мельницы. Алгоритм управления представлен на рисунке 19, б.



а)



б)

Рисунок 19 - Схема устройства (а) и алгоритм управления мельницей (б):
 1 - вибропреобразователь; 2 - статор; 3 - датчик расхода волокнистого материала; 4 - входной патрубок; 5 - блок деления; 6 - блок сравнения;
 7 - механизм присадки; 8 - задатчик

Управление функционированием по высокочастотной вибрации статора не менее эффективно, чем по ранее известным диагностическим признакам. Управление функционированием мельниц по параметрам высокочастотной вибрации статора позволило снизить энергоемкость, повысить долговечность гарнитуры и стабилизировать показатели древесной массы на выходе из мельницы. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения системы на одной мельнице RT-70 составил 7,3 млн. рублей.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Волокнистый материал при размоле подвергается напряжению в виде импульсного воздействия с частотами перекрещивания ножей (гарнитурными частотами). Предел текучести волокнистого материала зависит от следующих факторов (перечислены в порядке значимости): вид полуфабриката, степень помола и средняя длина волокна, концентрация и расход волокнистого материала. В зависимости от вида трения между ротором и статором предложены следующие модели волокнистого материала: при жидкостном трении - модель Максвелла-Томсона, при граничном трении - модель Гука. При жидкостном трении изменяется коэффициент демпфирования модели, а при граничном - коэффициент жесткости.

2. Для исследования силового взаимодействия гарнитуры с волокнистым материалом предложены и апробированы основы теории дискретного контакта ножей. Контактные характеристики при размоле зависят от:

- параметров, характеризующих нагрузку и внедрение ножей в волокнистый материал;
- свойств волокнистого материала и числа Деборы при размоле;
- плотности контакта ножей ротора и статора.

Исследованы прикладные контактные задачи с учетом износа гарнитуры и тепловыделения в зоне размола. Форма износа ножей зависит от триботехнических свойств материала гарнитуры, от отношения времени релаксации и последствия волокнистого материала и от отношения времени воздействия ножей гарнитуры за один период к времени последствия волокнистой прослойки.

Максимальная температура в зоне контакта наблюдается в зоне 0,50 - 0,70 радиуса гарнитуры от оси вращения ротора. Выявлены условия движения пара к периферии и к центру размалывающей гарнитуры. Рекомендуется удалять пар непосредственно из зоны контакта с максимальной температурой.

Разработаны и апробированы методики для определения температуры, осевой силы и температурных напряжений в ножах гарнитуры. Температурные напряжения в материале ножей в 6 - 10 раз меньше предела текучести металла.

Исследование деформационной составляющей коэффициента трения между ротором и статором показало, что с увеличением концентрации размалываемого материала с 20 до 45% эта составляющая коэффициента трения увеличивается с 0,4 до 0,8. При увеличении давления в межножевом зазоре с 0,50 до 0,65 МПа коэффициент трения возрастает от 0,42 до 0,51 при концентрации во-

локнистого материала 20%. Коэффициент трения при размоле волокнистых материалов низкой концентрации возрастает с 0,11 до 0,18 и снижается при размоле щепы и массы высокой концентрации с 0,65 - 0,80 до 0,42 - 0,50 при увеличении скорости ротора от 30 до 200 м/с. При уменьшении приведенного модуля упругости материала гарнитуры с $2,1 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^3$ МПа коэффициент трения снижается в 1,5 - 1,8 раза.

3. Разработаны рекомендации для снижения энергоемкости и повышения эффективности процесса размола:

- использовать гарнитуру с высокой плотностью контакта ножей;
- применять износостойкий материал гарнитуры с более низким модулем упругости, чем сталь. Например, износостойкие пластические материалы;
- снижать параметры вязкоупругих свойств волокнистого материала путем термической или химико-термической обработки перед размолом;
- увеличивать скорость вращения ротора при размоле щепы и массы высоких концентраций и снижать при размоле массы низких концентраций;
- удалять из зоны размола пар при размоле щепы и подавать в зону размола воду.

При граничном трении ротора и статора резко возрастает амплитуда высокочастотной вибрации статора. Коэффициент трения и мощность привода при этом снижаются (особенно при размоле щепы и массы высокой концентрации), но резко увеличивается интенсивность износа гарнитуры. Рекомендуется не допускать граничного трения ротора и статора при эксплуатации мельниц.

В зоне размола целесообразно использовать вместо трения скольжения трение качения. Предложены и защищены патентами конструкции таких размалывающих машин.

4. Исследована модель потоков волокнистого материала в гарнитуре мельницы. При увеличении частоты вращения ротора с 600 до 1000 мин⁻¹ расход волокнистого материала в канавках ротора увеличивается в 2,3 - 5,4 раза, а его скорость в 2,4 - 2,6 раза. Расход и скорость потока в канавках статора не зависят от частоты вращения ротора. При увеличении разницы давления между выходом и входом канавки гарнитуры с 60 до 135 кПа расход в канавках ротора уменьшается в 1,4 - 1,5 раза и увеличивается в канавках статора в 2,1 - 2,2 раза. Поток в канавке ротора направлен от центра к периферии гарнитуры, а в статоре, наоборот, от периферии к центру.

Скорость потока в межножевой канавке статора при увеличении перепада давления с 60 до 135 кПа увеличивается 2,3 - 2,6 раза, а у ротора скорость потока снижается в 1,6 - 2,7 раза. Скорость потока в канавке ротора изменяется при изменении угла наклона канавки к радиусу гарнитуры. При угле наклона 20° по направлению вращения ротора скорость потоков увеличивается в 1,2 раза. И при угле наклона 20° против направления вращения ротора скорость потока уменьшается в 1,1 раза. При входе в межножевую канавку ротора скорость потока резко возрастает, достигает максимума на длине канавки 5 - 10 мм, затем монотонно повышается примерно в 1,2 - 1,5 раза по ходу канавки. Интенсивность гидродинамических вихрей в роторе выше, чем в статоре.

Вибрационные процессы гидродинамического происхождения в основном определяются ударом потока полуфабриката о лопасти шнека и ножевую гарнитуру на входе в мельницу. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышает 20%.

5. Разработаны и апробированы математические модели, описывающие колебания мельниц и их элементов. Погрешность между теоретическими и экспериментальными исследованиями частот свободных колебаний мельниц и их элементов не превышает 10%.

Амплитуда колебаний ротора и статора зависит от вида трения между гарнитурами. Амплитуда колебаний статора в 1,6 - 2,3 раза меньше, чем амплитуда колебаний ротора. При граничном трении амплитуда колебаний статора и ротора увеличивается в 2 - 3 раза по сравнению с жидкостным трением. Амплитуда колебаний ротора и статора сопоставима с зазором между этими элементами.

Амплитуда колебаний ротора в подшипниках с натягом значительно меньше по сравнению с подшипниками с зазором. Рекомендуется устранить радиальные зазоры в подшипниковых узлах и применять подшипники с предварительным натягом для обеспечения стабильного межножевого зазора. Предложена методика расчета силы предварительного натяга в подшипниковых опорах для стабилизации положения ротора.

Исследованы, разработаны и защищены патентами конструкции автобалансировочных устройств применительно к роторам мельниц. Рекомендуется применение этих устройств в конструкциях ножевых размалывающих машин.

6. Предлагается установить два критерия оценки вибрационного состояния мельниц: амплитуда вибрации в октавных полосах частот и тренд вибрации по общему уровню. Численно определены границы зон и тренда вибрации ножевых размалывающих машин и дана качественная оценка интенсивности вибрации мельниц. На основе которой принимается решение об ограничении функционирования этих машин (предупреждение и останов).

При проектировании и эксплуатации ножевых размалывающих машин необходимо чтобы межножевой зазор между ротором и статором не превышал амплитуду колебаний ротора мельницы. Поэтому рекомендуется при проектировании мельниц разработка методов и средств виброзащиты, а при эксплуатации – не допускать граничного трения между гарнитурами.

Разработаны рекомендации по снижению колебаний ножевых размалывающих машин, которые внедрены на предприятиях отрасли. По разработанным методикам рассчитана и внедрена система виброзащиты мельниц TF-52 и TWIN-66 на АО «Соликамскбумпром», МД-31 и RT-70 на АО «Туринский ЦБЗ».

7. Параметры высокочастотной гарнитурной вибрации зависят от типа-размера мельницы, частоты вращения ротора, числа и угла перекрещивания ножей ротора и статора, технического состояния гарнитуры, технологических и режимных факторов размола. При исследовании гарнитурных частот необходимо учитывать эффект Доплера. Погрешность расчета гарнитурных частот без

учета вышеназванного эффекта может достигать 40% и более, с учетом - не более 8%.

Выявлено влияние на высокочастотную вибрацию статора технологических и режимных факторов размола. Наибольшее влияние на амплитуду гармонических частот оказывают факторы (перечислены в порядке значимости): характеристики бумажной массы на входе в мельницу; удельная нагрузка на кромки ножей или расход полезной энергии; концентрация массы и расход массы. Разработаны и защищены патентами методы и средства вибрационной диагностики структурных параметров технического состояния гарнитуры по параметрам вибрации: износа ножей, биения ротора и перекоса статора.

8. На основе выявленной корреляции между приростом показателей размалываемого материала и параметрами высокочастотной вибрации статора разработаны, защищены патентами и внедрены методы и средства управления функционированием ножевых размалывающих машин.

Управление функционированием мельниц по параметрам высокочастотной вибрации статора позволило снизить энергоемкость, повысить долговечность гарнитуры и стабилизировать показатели древесной массы на выходе из мельницы. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения системы на одной мельнице RT-70 составил 7,3 млн. рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

- Статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. **Vikharev S.N.** Engineering of the knife grinding machine milling process/ Aerospace 2018 IOP Conf. Series: MIST Materials Science and Engineering **450** (2018) 032020 doi:10.1088/1757-899X/450/3/032020.

2. **Vikharev S.N.**, Alashkevich J. D. Modeling of milling processes in knife grinding machines/ Aerospace 2018, IOP Conf. Series: MIST IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **450** (2018) 032037 doi:10.1088/1757-899X/450/3/032037.

3. **Vikharev S.N.** Contact problem at mill semi finished items with the account of the thermal emission and forces in knife grinding machines/ FORESTRY 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **226** (2019) 012010 IOP Publishing, doi:10.1088/1755-1315/226/1/012010.

4. **Vikharev S.N.** Research mill fibrous semi-finished products with the help theories of contact interaction of knives /FORESTRY 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science **226** (2019) 012048, IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/226/1/012048.

5. **Vikharev S.**, Zasyapkina S.A. Study of longitudinal vibrations of stab knife refiners / Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. С. 44011.

6. **Vikharev S.N.** Vibration diagnostics of plates of knife refiners / Journal of Physics: Conference Series. International Scientific Conference "Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations; Polytechnical Institute of Siberian Federal University. 2019. C. 44008.
7. **Vikharev S.N.** Vibration processes in the knife refining machines/ IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. C. 012079.
8. **Vikharev S.N.** Research of a fibrous layer at refining in the refiners / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. C. 012080.
9. **Vikharev S.N.** Vibration calculation of the plate knives in refining machines / IOP Publishing: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **537** (2019) 032008 doi:10.1088/1757-899X/537/3/032008.
10. **Vikharev S.N.** Features of the rotor dynamics of knife refining machines / IOP Publishing: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **537** (2019) 032015 doi:10.1088/1757-899X/537/3/ 032015.
11. **Vikharev S.N.** Dynamic calculation of knife refining machines together with a supporting structure/ IOP Publishing: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **537** (2019) 032021 doi:10.1088/1757-899X/537/3/032021.
12. **Vikharev S.N.** Automatic Control of Operation of the Knife Grinding Machines/2019 International Science and Technology Conference "EastConf" Date of Conference: 1-2 March 2019 Date Added to IEEE Xplore: 30 May 2019 DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725416 Publisher: IEEE Conference Location: Vladivostok, Russia, Russia.
13. **Vikharev S.**, Sivakov V., Sannikov A. Rationing and vibration monitoring of knife refiners/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 12040.
14. **Vikharev S.N.**, Sannikov A., Zinatov M. Flexural fluctuations of the rotors of knife refiners / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 12040.
15. **Vikharev S.N.** Vibroacoustic processes of grinding fibrous semi-finished products in the knife refiners/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 12046.
16. **Vikharev S.N.** Longitudinal fluctuations of rotors of disk knife refiners / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 12044.
17. **Vikharev S.N.** Reliability of plate of knife refiners / JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. C. 42005.

18. **Vikharev S.N.** Automatic balancing devices of rotors of the knife refiners / IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 42002.

19. **Vikharev S.N.** Hydrodynamic vibration of knife refiner / IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 42057.

20. **Vikharev S.N.** Research of stability of rotor of the knife grinding refiners / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **862** (2020) 032090 IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/862/3/032090.

21. **Vikharev S.N.** Friction coefficient research at refining of fibrous semi-finished products / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **919** (2020) 032017 IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/919/3/032017.

- Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

22. **Вихарев С.Н.** Виброзащита рафинеров производств химико-механической массы / С.Н. Вихарев, В.П. Сиваков, С.А. Душинина, А.Н. Федотов // Целлюлоза, бумага, картон. - 2006. - №1. С. 66-67.

23. Ложкин Г.А. Комплексные динамические испытания оборудования целлюлозно-бумажных производств / Г.А. Ложкин, **С.Н. Вихарев**, В.П. Сиваков, В.Ф. Мусихин, А.А. Санников // Целлюлоза, бумага, картон. - 2006. - № 11. С.46-48.

24. **Вихарев С.Н.** Исследование температурных напряжений гарнитуры дисковых мельниц / С.Н. Вихарев// Целлюлоза, бумага, картон. - 2007.- № 12. С.57-60.

25. **Вихарев С.Н.** Исследование колебаний ножей гарнитуры при размоле волокнистых полуфабрикатов/ С.Н. Вихарев, С.А. Душинина // Лесной вестник. – 2007.- №8. С.180-184.

26. Сиваков В. П. Обоснование технического обслуживания оборудования целлюлозно-бумажного производства диагностированием / В. П. Сиваков, **С.Н. Вихарев**, С.А. Мишин, В.И. Музыкантова // Лесной журнал. 2009. – № 3. – С. 118-125.

27. **Вихарев С.Н.** Динамика роторов дисковых мельниц // С.Н. Вихарев, В.П. Сиваков // Вестник Казанского государственного технического университета, 2012. – № 6. – 4 с.

28. **Вихарев С.Н.** Контактное взаимодействие гарнитуры мельниц с волокнистым полуфабрикатом / С.Н. Вихарев // Лесной журнал, 2013. - №3, с.133-138.

29. Патент на изобретение № 2285564 РФ. Способ регулирования процесса размола бумажной массы / **С.Н. Вихарев**, И.Т. Рогожникова, М.А. Гневанов//заявитель и патентообладатель: УГЛТУ; заявл. 13.05.2002, 22002112957/12; опуб. в Б.И., 2006, № 29.

30. **Вихарев С.Н.** Динамические испытания машин - эффективный метод оценки их технического состояния/ С.Н. Вихарев, В.П. Сиваков, Ю.С. Вихарев

ва // Вестник Казанского технологического университета, 2013, №13, т.16, с. 102-105.

31. **Вихарев С.Н.** Модель волокнистой прослойки при размоле в дисковых мельницах // С.Н. Вихарев, С.А. Душинина // Лесной журнал, САФУ, 2014. №2 - С. 116-122.

32. **Вихарев С.Н.** Осевые силы, возникающие при размоле в дисковой мельнице / С.Н. Вихарев // Лесной журнал, САФУ, №6, 2013, с. 107-114.

33. **Вихарев С.Н.** Исследование размола волокнистых материалов в ножевых машинах с учетом износа гарнитуры / С.Н. Вихарев, Ю.Д. Алашкевич, В.П. Сиваков // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39) р. 108-115.

34. Сиваков В.П. Допустимые параметры вибрации при диагностировании оборудования/ В.П. Сиваков, **С.Н. Вихарев**, А.В. Вураско // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 5. С. 25-30.

35. Сиваков В.П. Периодичность диагностирования оборудования при вибрационном контроле / В.П. Сиваков, **С.Н. Вихарев**, А.В. Вураско // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 8. С. 24-28.

36. Вураско А.В. Исследование технологических характеристик полотна бумаги и вибрации оборудования для обеспечения качества продукции/А.В. Вураско, В.П. Сиваков, **С.Н. Вихарев**, А.Д. Мешков, Э.Р. Мухамедзянова // Вестник Казанского технологического университета, 2013, №13, т.16, с. 248-251.

- Диссертация

37. **Вихарев С.Н.** Разработка методов и средств вибрационной диагностики дисковых мельниц: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03/Вихарев Сергей Николаевич. - Екатеринбург, 1993. -256 с.

- Авторские свидетельства, патенты

38. Пат. 53677 РФ, D 21 B 1/14. Устройство регулирования процесса размола бумажной массы в дисковых мельницах/ **С.Н. Вихарев**, С.А. Душинина, Н.А. Воинкова (Россия). - № 2005110195/22; Заявлено 07.04.2005; Оpubл. 27.05.2006, Бюл. №15.

39. Пат. 58125 РФ, D 21 D 1/30. Гарнитура дисковых мельниц/ **С.Н. Вихарев**, С.А. Душинина, С.Н. Янковская (Россия). - № 2006116905/22; Заявлено 16.05.2006; Оpubл. 10.11.2006, Бюл. № 31.

40. Пат. 58547 РФ, D 21 D 1/38. Дисковая мельница/ **С.Н. Вихарев**, С.А. Душинина, А.С. Душинин (Россия). - № 2006123207/22; Заявлено 29.06.2006; Оpubл. 27.11.2006, Бюл. № 33.

41. Пат. 103108 РФ, D 21 D 1/00. Гарнитура дисковой мельницы/ **С.Н. Вихарев**, Г.В. Банников (Россия). - № 2010126623/22; заяв. 29.06.2010; опубл. 27.03.2011, бюл. №9.

42. Пат. 108042 РФ, D 21 D 1/30. Мельница для размола волокнистых материалов / **С.Н. Вихарев**, М. С. Агарков (Россия). - №2011102792/12; заяв. 25.01.2011; опубл. 10.09.2011, бюл. №25.

43. Пат. 110377 РФ, D 21 D 1/00. Наборная гарнитура для роспуска волокнистых материалов / **С.Н. Вихарев**, М. А. Гусев (Россия). - №2011120588/12; заяв. 20.05.2011; опубл. 20.11.2011, бюл. №32.

44. Пат. 125203 РФ, D 21 D 1/30. Гарнитура дисковых мельниц/ **С.Н. Вихарев**, М. М. Букей (Россия). - №2012138841/12; заяв. 10.09.2012; опубл. 27.02.2013, бюл. №6.

45. Пат. 39341 РФ, 7 D 21 D 1/30. Устройство для регулирования процесса размола в дисковой мельнице/ **С.Н. Вихарев**, А.Л. Бебенин, И.Т. Рогожникова (Россия). - №2003135975/22; заяв. 15.12.2003; опубл.27.07.2004, Бюл. № 21

46. Пат. 46757 РФ, 7 D 21 D 1/30. Устройство для замены гарнитуры в дисковых мельницах/ **С.Н. Вихарев**, Носов В. Г. (Россия). - №2005106425/22; заяв. 09.03.2005; опубл.27.07.2005, Бюл. № 21.

47. Пат. 46756 РФ, 7 D 21 D 1/30. Машина для размола волокнистых полуфабрикатов/ **С.Н. Вихарев**, С.А. Сыров (Россия). - № 2005104682/22; заяв. 21.02.2005; опубл.27.07.2005, Бюл. № 21.

48. Пат. 71340 РФ, 7 D 21 D 1/30. Дисковая мельница/ **С.Н. Вихарев**, Г. Т. Насыкова (Россия). - № 2007133276/22; заяв. 04.09.2007; опубл.10.03.2008, Бюл. № 7.

49. Пат. 76648 РФ, 7 D 21 D 1/30. Гарнитура дисковой мельницы / **С.Н. Вихарев**, А. В. Кулакова (Россия). - №2008116181/22; заяв. 24.04.2008; опубл.27.09.2008, Бюл. № 27.

50. Пат. РФ № 136808, 7 D 21 D 1/30. Дисковая мельница для размола волокнистых материалов/ **С.Н. Вихарев**, Д.Г. Шамиев (Россия). - №2009111286/22, заяв. 24.05.2013, опубл. 20.01.2014, бюл. №2.

51. Пат. РФ № 134936, 7 D 21 D 1/30. Дисковая мельница/ **С.Н. Вихарев**, В.Н. Микушина (Россия). - №2009102123/22, заяв. 12.04.2013, опубл. 27.11.2013, бюл. №33.

52. Свид. на полезную модель РФ № 9851, 7 D 21 D 1/30. Дисковая мельница/ **С.Н. Вихарев**, В.М. Морозов (Россия), заяв. № 98120420, опубл. 16.11.98.

53. Свид. на полезную модель РФ № 10183, 7 D 21 D 1/30. Устройство регулирования параллельности гарнитур дисковой мельницы/ **С.Н. Вихарев**, Е.Г. Кучумов, Е.Н. Медведева (Россия), заяв. № 98122050, опубл. 07.12.98.

54. Свид. на полезную модель РФ № 14584, 7 D 21 D 1/3. Устройство регулирования процесса размола бумажной массы в дисковой мельнице/ **С.Н. Вихарев**, Е.Г. Кучумов, Н.А. Башко, М.И. Рогальникова (Россия), заяв. №99126376/20, опубл. 15.12.1999.

55. Свид. на полезную модель РФ №14585, 7 D 21 D 1/3. Устройство регулирования размола в сдвоенной дисковой мельнице/ **С.Н. Вихарев**, Е.Г. Кучумов, О.В. Антонова (Россия), заяв. №2000106921/20, опубл. 21.03.2000.

56. Свид. на полезную модель РФ №20107, 7 D 21 D 1/3. Дисковая мельница/ **С.Н. Вихарев**, Е.Г. Кучумов, И.Г. Жданов (Россия), заяв. №2001108125/20, опубл. 28.10.2001.

57. Пат. РФ № 160064, 7 D 21 D 1/00. Дисковая мельница для размола волокнистых материалов/ **С.Н. Вихарев**, А.Х. Хисматуллин (Россия),

№ 2015114059 /12; заяв.15.04.2015; опубл.27.02.2016, Бюл. № 6.

58. Пат. РФ № 166429, 7 В02С 7/12. Элемент размольной гарнитуры/ **С.Н. Вихарев**, Н.К. Прядилина, Д.О. Цыганков (Россия), № 2015156577/13; заявл. 28.12.2015; опубл.27.11.2016, Бюл. № 33.

59. Пат. РФ № 172215, 7 В02С 7/12. Гарнитура дисковой мельницы/ **С.Н. Вихарев**, Н.К. Прядилина, А.Ю. Белов, А.Я. Прохоров (Россия), № 2016145211; заявл. 17.11.2016.

60. Пат. РФ №186651, 7 В02С 7/12. Гарнитура дисковой мельницы/ **С.Н. Вихарев**, Н.К. Прядилина, М.М. Бочаров (Россия), опубл. 25.04.2018.

61. Пат. РФ № 194532, 7 В02С 7/12. Гарнитура дисковой мельницы/ **С.Н. Вихарев**, М.Д. Григорьев (Россия), № 2019129272 от 16.09.2019, опубл. 13.12.2019.

62. Авторское свидетельство SU 1747579. Способ регулирования процесса размола бумажной массы / **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. (Россия), № 4797201 от 28.02.1990, опубл. 15.07.1992.

63. Авторское свидетельство SU 1677122. Дисковая мельница для размола волокнистых материалов/ **Вихарев С.Н.**, Тренькин А.И., Добрынин А.А. (Россия), № 4674894 от 06.04.1989, опубл. 15.09.1991.

64. Авторское свидетельство SU 1724770. Способ определения степени износа гарнитуры дисковой мельницы/ **Вихарев С.Н.**, Фанаков А.А. (Россия), № 4846121 от 12.07.1990, опубл. 07.04.1992.

65. Авторское свидетельство SU 1703749. Дисковая мельница / **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. (Россия), № 4701619 от 06.06.1989, опубл. 07.01.1992.

66. Авторское свидетельство SU 1559025. Сдвоенная дисковая мельница/ **Вихарев С.Н.**, Санников А.А., Анохина М.Ф. (Россия), № 4392210 от 14.03.1988, опубл. 23.04.1990

67. Авторское свидетельство SU 1448233. Стенд для вибрационной диагностики подшипников качения/ Санников А.А., Киряков А.Г., Щукин В.В., **Вихарев С.Н.** (Россия), №4259666 от 10.06.1987, опубл. 30.12.1988.

68. Пат. РФ № 199500, 7 В02С 7/12. Дисковая мельница для размола волокнистых полуфабрикатов/ **С.Н. Вихарев**, М.Д. Григорьев (Россия), № 2020114627 от 14.04.2020, опубл. 04.09.2020.

- Монографии

69. **Вихарев, С.Н.** Динамика мельниц для размола волокнистых полуфабрикатов/ LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2013.- 184 с.

70. **Вихарев, С.Н.** Виброзащита ножевых размалывающих машин/ Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. - 147 с.

71. Вибрация и шум технологических машин и оборудования лесного комплекса/ Санников А. А., Старжинский В. Н., Куцубина Н. В., Сиваков В. П., **Вихарев С.Н.**, Черемных Н. Н. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2006. - 484 с.

- Статьи, материалы и тезисы конференций

72. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Диагностика и виброзащита оборудования древесно-массных цехов. Виброзащита и вибродиагностика технического состояния дисковых мельниц. Методические рекомендации. - М.: Минлесбумпром СССР. - 1989. 61 с.

73. Санников А.А., Кистер Я.Я., Вохменцев А.Е., **Вихарев С.Н.** Диагностика и виброзащита оборудования по производству древесных плит. Методические рекомендации. - М.: Минлесбумпром СССР. - 1990. 87 с.

74. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Критические частоты вращения роторов дисковых мельниц/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. научн.тр. - Л, 1988. - с.36-40.

75. **Вихарев С.Н.** Экспериментальные исследования процесса размола при помощи вибрации на гарнитуре статора/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз.сб.научн. тр.- Л., 1990. - С.29-33.

76. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Динамика, моделирование и система диагностики дисковой мельницы/ Моделирование и автоматизация сложных технических систем, Калуга, 1992, - с. 115-116.

77. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Продольные колебания роторов дисковых мельниц/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз.сб.научн.тр. - Санкт - Петербург, 1993- 94. - с.46-50.

78. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А., Башко Н.А. Вибрационная диагностика функционирования ножевых размалывающих машин/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз.сб.научн.тр. - Санкт - Петербург, 1993-94. - с.66-69.

79. **Вихарев С.Н.** Вибрация статора дисковой мельницы - диагностический признак качества размола и состояния гарнитуры/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз.сб.научн.тр. - Санкт - Петербург, 1993-94. - с.70-72.

80. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Колебания валов с дисками/ Виброакустические процессы в оборудовании ЦБП, УГЛТА, 1995, с. 106-118.

81. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Вибрационное проектирование и расчет дисковых мельниц/ Виброакустическое проектирование оборудования целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств, УГЛТА, Екатеринбург, с. 110-126.

82. **Вихарев С.Н.**, Витвинин А.М., Рогожникова И.Т. Вибрационная диагностика и регулирование параллельности ротора и статора дисковых мельниц/ Машины и оборудование ЦБП. Межвуз. сб. научн. трудов; Санкт-Петербург, 2001, с. 51-55.

83. **Вихарев С.Н.**, Витвинин А.М., Рогожникова И.Т. Способ управления функционированием мельниц/ Машины и оборудование ЦБП. Межвуз. сб. научн. трудов; Санкт-Петербург, 2001, с. 56-60.

84. **Вихарев С.Н.**, Душина С. А., Рогожникова И.Т. Управление функционированием мельниц - эффективный способ энергосбережения при размоле/

Актуальные проблемы лесного комплекса: Сборник научных трудов по итогам 5-й международной научно-технической конференции «Лес 2004». - Брянск, 2004. - с. 121-122.

85. **Вихарев С.Н.**, Душина С.А., А.М. Витвинин, И.Т. Рогожникова, Н.А. Воинкова. Исследование продольных колебаний дисковых мельниц/ Машины и аппараты целлюлозно - бумажного производства: Межвузовский сборник трудов - Санкт-Петербург, 2003. - с. 39-42.

86. Уфимцев В. Я., Пушкарёва О.Б., **Вихарев С.Н.** Электродвигатель как источник побочных движений крупных агрегатов ЛПК/ Лесной и химический комплексы - проблемы и решения, сб. статей по мат. конф., Красноярск, 2009, том 3, с.12-16.

87. **Вихарев С.Н.** Вибрация мельниц, возбуждаемая гидродинамическими процессами/ Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: моногр. сб. Екатеринбург, УГЛТУ, 2009, с.185-191.

88. **Вихарев С.Н.**, Душина С.А. Собственные частоты колебаний дисков мельниц/ Вибродиагностика, триботехника, вибрация и шум: моногр. сб., Екатеринбург, УГЛТУ, 2009, с.191-193.

89. Сиваков В. П., **Вихарев С.Н.** Проблема переработки макулатуры как компонента научной работы Уральского лесного технопарка по ресурсосбережению / 80 лет УГЛТУ - опыт высшего лесотехнического образования на Урале: мат. междунар. научн. - метод. конф. УГЛТУ, Екатеринбург. 2010. - С.87-91.

90. **Вихарев С.Н.**, Витвинин А.М., Сиваков В.П. Исследование свойств волокнистых материалов/ Машины и аппараты целлюлозно-бумажных производств: Межвуз. сб. научн. тр. - СПб.: СПб ГТУРП, 1997.

91. Сиваков В. П., **Вихарев С.Н.**, Вураско А.В., Мешков А.Д. Исследование технологических характеристик полотна бумаги и вибрации оборудования для обеспечения качества продукции/ Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: матер. II междунар. научн.-техн. конф. - Архангельск, 10-12 сентября 2013 г.: Северный (Арктический) федеральный университет им. Ломоносова, 2013. - С. 81-87.

92. **Вихарев С.Н.** Тенденции развития технологии и оборудования древесно-подготовительных и древесно-массных производств/ Подготовка кадров и эффективность производства: монографический сборник, УГЛТУ, 2013, с. 162-170.

93. **Вихарев С.Н.**, Душина С.А. Вынужденные колебания ножей дисковой мельницы/ Материалы Международного Евразийского симпозиума «Деревобработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века», УГЛТУ, 2013, с. 51-57.

94. **Вихарев С.Н.**, Палагушкин В. В., Гневанов М. А., Рогожникова И. Т. Размол и управление функционированием мельниц/ Технологии, машины и производство лесного комплекса будущего: Матер. международной научно-практической конференции. Ч. 1. - Воронеж: ВГЛТА, 2004. - С. 50-52.

95. **Вихарев С.Н.**, Загребина Т. В., Рогожникова И. Т. Исследование вибрации статора дисковой мельницы/ Науч. труды Урал. гос. лесотехн. ун-та и

Урал. отдел. секции наук о лесе Российской академии естеств. наук, вып. 3, 2004. - С. 17-20.

96. Сиваков В. П., **Вихарев С.Н.**, Музыкантова В.И. Обоснование ремонтов методами диагностирования/ Сборник материалов 1 региональной отраслевой научно-практической конференции. Г. Соликамск, 1-2марта 2013г., Пермский ЦНТИ, 2013, с. 246-254.

97. Сиваков В.П., **Вихарев С.Н.**, Вураско А.В. Исследование колебаний массы бумаги в продольном направлении на плоскосеточной БДМ/ Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов, 4 международ. научно-техническая конференция, Архангельск, 14-16 сентября 2017, с. 92-95.

98. **Вихарев С.Н.**, Цыганков Д.А. Исследование сил, действующих на волокнистый полуфабрикат в ножевых размалывающих машинах / цивилизованные парадигмы XXI столетия: культурно-ценностные ориентиры: Материалы Международной научной конференции, 2017. С. 35-38.

99. Прядилина Н.К., Мезенова В.В., **Вихарев С.Н.**, Куклинов М.Л. Экономический обзор и перспективы российского рынка бумаги/ Политематический журнал научных публикаций «Дискуссия» №4 (67), апрель 2016, с. 56-63.

100. **Вихарев С.Н.** Вибрационные процессы при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых мельницах/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 12 междунар. Евразийского симпозиума 19-22 сент. 2017 г., с. 107-113.

101. **Вихарев С.Н.** Силы, действующие на волокнистый полуфабрикат в ножевых размалывающих машинах/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 12 междунар. Евразийского симпозиума 19-22 сент. 2017 г., с. 114-117.

102. **Вихарев С.Н.** Исследование воздействий гарнитуры на волокно при размоле/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 12 междунар. Евразийского симпозиума 19-22 сент. 2017 г., с. 118-121.

103. **Вихарев С.Н.** Исследование времени релаксации древесины и волокнистых полуфабрикатов/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 13 междунар. Евразийского симпозиума, 2018г., с. 61-64.

104. **Вихарев С.Н.** Исследование стабильности межножевого зазора размалывающих машин/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 13 междунар. Евразийского симпозиума, 2018г., с. 148-151.

105. **Вихарев С.Н.** Надежность гарнитуры ножевых размалывающих машин/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 13 междунар. Евразийского симпозиума, 2018г., с. 151-155.

106. Сиваков В.П., **Вихарев С.Н.** Обоснование ремонта оборудования производства целлюлозы и термомеханической массы методами технического диагностирования/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент 21 века/ Труды 13 междунар. Евразийского симпозиума, 2018г., с. 191-197.

107. **Вихарев С.Н.**, Чистяков Н.В. Исследование биения роторного диска мельницы МД-31/ Лесная наука в реализации концепции уральской инженер-

ной школы: Социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики, УГЛТУ, 2019. С.15-17.

108. **Вихарев С.Н.**, Зинатов М.Г. Повышение эффективности размалывающей гарнитуры дисковой мельницы/ Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: Социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики, УГЛТУ, 2019. С.10-12.

109. **Вихарев С.Н.** Наборная гарнитура размалывающих машин/ Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: Социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики, УГЛТУ, 2019. С.7-9.

110. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Свободные частоты колебаний роторов дисковых мельниц// Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. - С. - Пб., 1994. - С. 95-98.

111. **Вихарев С.Н.**, Санников А.А. Вибрационный контроль степени износа гарнитуры дисковой мельницы// Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. - С.- Пб., 1994. - С. 84-87.

112. **Вихарев С.Н.**, Витвинин А.М., Санников А.А. Исследование неуравновешенности ротора дисковой мельницы// Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. С.-Пб., 1997. - С. 59-62.

113. **Вихарев С.Н.**, Григорьев М.Д. Сегментная наборная гарнитура ножевых размалывающих машин/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XIV Международного евразийского симпозиума. УГЛТУ, 2019. С. 120-122.

114. **Вихарев С.Н.**, Чистяков Н.Е. Исследование биений роторного диска мельницы/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. труды XIV Международного евразийского симпозиума, УГЛТУ, 2019. С. 125-128.

115. **Вихарев С.Н.**, Зинатов М.Г. Исследование числа Деборы волокнистой прослойки при размоле волокнистых полуфабрикатов/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. труды XIV Международного евразийского симпозиума, УГЛТУ, 2019. С. 122-125.

116. **Вихарев С.Н.** Исследование процесса размола/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XV Международного евразийского симпозиума, УГЛТУ, 2020. С. 29-34.

117. **Вихарев С.Н.**, Загородских Д.С. Автоматическая балансировка роторов мельниц/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XV Международного евразийского симпозиума, УГЛТУ, 2020. С. 93-96.

118. **Вихарев С.Н.**, Корняков Н.А. Исследование крепления гарнитуры мельницы/ Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XV Международного евразийского симпозиума, УГЛТУ, 2020. С. 96-98.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенной подписью и указанием фамилии, имени, отчества, почтового адреса, наименования организации, должности и ученой степени (с указанием шифра специальности, по которой была защищена диссертация) лица, составившего отзыв, просим направлять по адресу: 620100 г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37, УГЛТУ, диссертационный совет Д.212.281.02, e-mail: d21228102@yandex.ru.

Подписано в печать Объем 1,0 п.л. Заказ № . Тираж 100 экз. 620100 г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет». Сектор оперативной полиграфии РИО.